

2008

Faisabilité de l'étude sur les gaz de fermentation et sur la ventilation en silo à échelle réduite

Ali Bahloul

IRSST, ali.bahloul@irsst.qc.ca

Brigitte Roberge

IRSST

Rodrigue Gravel

IRSST

Suivez ce contenu et d'autres travaux à l'adresse suivante: <https://pharesst.irsst.qc.ca/rapports-scientifique>

Citation recommandée

Bahloul, A., Roberge, B. et Gravel, R. (2008). *Faisabilité de l'étude sur les gaz de fermentation et sur la ventilation en silo à échelle réduite* (Rapport n° R-553). IRSST.

Ce document vous est proposé en libre accès et gratuitement par PhareSST. Il a été accepté pour inclusion dans Rapports de recherche scientifique par un administrateur autorisé de PhareSST. Pour plus d'informations, veuillez contacter pharesst@irsst.qc.ca.

Substances chimiques et agents biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-553



**Faisabilité de l'étude sur les gaz de fermentation
et sur la ventilation en silo à échelle réduite**

*Ali Bahloul
Brigitte Roberge
Rodrigue Gravel*



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

Mission *travaillent pour vous !*

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
2008

ISBN : 978-2-89631-245-0 (version imprimée)

ISBN : 978-2-89631-246-7 (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,
avril 2008

Substances chimiques et agents biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-553

Faisabilité de l'étude sur les gaz de fermentation et sur la ventilation en silo à échelle réduite

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 et Rodrigue Gravel,
Service soutien à la recherche et à l'expertise, IRSST*

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



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

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSS

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

REMERCIEMENTS

Les auteurs du présent rapport remercient les personnes suivantes pour leur contribution à la réalisation de cette étude préliminaire, Saadani Meryem Hassani de l'École Polytechnique de Montréal, Meriem Menai de l'Université de Montréal, Nicole Goyer et Pierre Drouin de l'IRSST.

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). Ils ont été le site d'accidents graves et souvent mortels. Afin de tenir compte des dangers et des risques dans des silos à fourrage à tour conventionnelle, l'utilisation de silos à échelle réduite a été envisagée pour la réalisation d'une étude sur les silos.

Dans la présente étude préliminaire, un silo à l'échelle réduite a été conçu en laboratoire afin d'estimer la faisabilité de les utiliser et de les modifier, s'il y a lieu. Le processus de fermentation dans une telle situation a donc été suivi par la mesure des gaz et autres paramètres de l'ensilage. Les données obtenues des gaz de fermentation pour un cas d'ensilage du maïs épis des essais préliminaires de ventilation ont servi à améliorer la conception du silo à échelle réduite et la méthodologie du projet 099-557 intitulé Prévention des intoxications dans les silos à fourrage.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	i
SOMMAIRE.....	iii
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
1. CONTEXTE	1
2. Objectifs de l'activité.....	5
3. Méthodologie	7
3.1 Conception d'un silo à échelle réduite.....	7
3.2 Fermentation du fourrage.....	8
3.2.1 Méthodologie de prélèvement des gaz de fermentation	9
3.3 Ventilation des silos.....	10
4. Résultats et discussion	13
4.1 Conditions du fourrage	13
4.2 Fermentation du fourrage.....	13
4.3 Résultats expérimentaux de la ventilation et interprétations	15
4.3.1 Démarche expérimentale permettant de déterminer le temps de ventilation et résultats expérimentaux	16
4.3.2 Interprétations des résultats expérimentaux des tests de ventilation	18
4.3.3 Comparaison des résultats expérimentaux et théoriques	18
4.3.4 Comparaison expérimentale des deux modes de ventilation par aspiration et par soufflage.....	19
4.4 Modifications apportées au projet Prévention des intoxications dans les silos à fourrage.....	21
5. Conclusion	23
6. Références.....	25

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Prototype de silo à échelle réduite.....	7
Figure 2 : Vue interne du prototype de silo à échelle réduite	8
Figure 3 : Schéma du silo à échelle réduite	9
Figure 4 : Fourrage utilisé : maïs épis.....	13
Figure 5 : Schéma des dispositifs utilisés pour la ventilation.....	16
a) par aspiration ; b) par soufflage	16
Figure 6 : Évolutions du O ₂ et de CO ₂ durant la ventilation par aspiration.....	17
Figure 7 : Évolution du CO ₂ dans le silo après l'arrêt de ventilation	18
Figure 8 : Évolution du CO ₂ durant la ventilation par aspiration	19
Figure 9 : Temps de ventilation par aspiration et soufflage en fonction de la concentration initiale de O ₂	20

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Valeurs d'exposition admissibles du RSST (1)	1
Tableau 2 : Effets sur le corps humain de différentes concentrations d'oxygène	2
Tableau 3 : Effets sur le corps humain de différentes concentrations de dioxyde d'azote.....	2
Tableau 4 : Liste des instruments utilisés pour mesurer les gaz.....	10
Tableau 5 : Résultats des analyses d'ensilage.....	14

1. CONTEXTE

Au Québec, le tiers des producteurs agricoles embauchent des travailleurs et, par conséquent, sont couverts par la CSST. Entre 2000 et 2005, 15 dossiers ont été ouverts à la CSST. Cinq de ces dossiers sont reliés à des silos à fourrage comprenant deux cas d'intoxication et trois chutes.

Les silos, considéré selon le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) (1) comme des espaces clos, servent notamment à entreposer le fourrage. Le processus de fermentation de celui-ci (maïs fourrager, luzerne, fléole et autres graminées) le rend plus digestible et nourrissant pour le bétail. Au cours de ce processus, la production de gaz, tels le dioxyde de carbone (CO₂), le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂) ainsi que l'abaissement de la quantité d'oxygène (O₂) (2-4) rendent l'entrée périlleuse d'une personne dans cet espace clos. Il est possible d'entrer dans cet espace en montant dans l'échelle extérieure apposée à la structure d'une hauteur de 60 à 100 pieds ou via les barreaux intégrés aux portes d'accès au silo. Cette dernière voie d'entrée, fréquemment appelée chute, est recouverte d'une membrane, ce qui en fait également un espace clos. Ces gaz sont produits au cours du processus de fermentation du fourrage (2-4). Le RSST recommande des valeurs d'exposition admissibles (VEA) pour ces gaz, qui sont résumées au tableau 1. Dans un espace clos, la concentration en O₂ doit être supérieure ou égale à 19,5 % et inférieure ou égale à 23 % (1).

Tableau 1 : Valeurs d'exposition admissibles du RSST (1)

Gaz	VEMP			VECD		
	ppm	%	mg/m ³	ppm	%	mg/m ³
Dioxyde de carbone (CO ₂)	5 000	0,05	9 000	30 000	3,0	54 000
Monoxyde d'azote (NO)	25		31			
Dioxyde d'azote (NO ₂)	3		5,6			

VEMP : Valeur d'exposition moyenne pondérée – 8h.

VECD : Valeur d'exposition de courte durée – 15 min.

L'intoxication par ces gaz toxiques ou une atmosphère déficiente en O₂, remplacé par le CO₂, sont des causes d'accidents dans les silos à fourrage. On retrouve deux catégories de silos à fourrage : les silos à tour hermétique ou conventionnelle (5). Ces silos ont une forme cylindrique allongée en hauteur. Les silos à tour conventionnelle sont plus répandus en milieu agricole au Québec. Leur remplissage s'effectue par soufflage du fourrage, préalablement haché, par le haut. Contrairement au silo hermétique où le producteur n'y entre jamais, ce dernier pénètre en plusieurs occasions dans les silos, notamment 1) lors du remplissage du silo qui s'échelonne sur plus d'une journée, 2) pour égaliser le fourrage qui se compacte dans les premiers jours de la fermentation, 3) pour ouvrir une porte inférieure et installer les canalisations nécessaires pour récupérer l'ensilage. Ces entrées régulières dans ces espaces clos peuvent exposer les producteurs à des concentrations plus ou moins élevées de gaz toxiques ou asphyxiants susceptibles d'avoir un effet néfaste sur la santé des agriculteurs et des travailleurs.

La production du CO₂ est souhaitable pour la qualité du fourrage afin d'obtenir des conditions anaérobiques (absence d'oxygène) rapidement et ainsi réduire les pertes en matière sèche causées par les organismes aérobiques (levures, moisissures et bactéries). Le CO₂, asphyxiant simple, est nocif à haute concentration (2,3,9); il entraîne l'évanouissement et l'asphyxie (mort). Il prend la

place de l'O₂ et la déficience en O₂ présente des effets sur le corps humain (tableau 2) (4) Le NO₂ est un gaz toxique à faible concentration. À forte concentration, il peut entraîner la mort. Le tableau 3 présente l'effet du NO₂ (8), à différentes concentrations, sur les humains. Le NO₂ provient principalement de l'excès en nitrate dans le fourrage (10,11).

Tableau 2 : Effets sur le corps humain de différentes concentrations d'oxygène

Concentration en O ₂	Effets sur le corps humain
Environ 21 %	Concentration normale d'oxygène dans l'air. Aucun effet.
19,5 %	Concentration minimum acceptable dans l'air.
12 - 16 %	Respiration saccadée, anxiété, fatigue anormale suite à des mouvements.
10 - 14 %	Accélération de la respiration et du rythme cardiaque, euphorie, maux de tête.
6 - 10 %	Nausées et vomissement, incapacité de bouger librement, possibilité de perte de conscience et d'effondrement tout en restant conscient.
Moins de 6 %	Arrêt respiratoire suivi d'un arrêt cardiaque; mort en quelques minutes.

Tableau 3 : Effets sur le corps humain de différentes concentrations de dioxyde d'azote

Concentration en NO ₂	Effets sur le corps humain
0,5 ppm	Seuil olfactif.
3 ppm	VEMP pour 8h par jour, 40 heures semaine selon le RSST.
1 - 5 ppm	Irritation légère des voies respiratoires (plus importante si hypersensibilité bronchique).
5 - 50 ppm	Irritation légère des yeux, du nez et de la gorge. Irritation modérée à sévère des poumons.
50 - 150 ppm	Irritation légère à modérée des yeux, du nez et de la gorge. Atteinte sévère des poumons.
> 150 ppm	Spasme des voies respiratoires, manque d'oxygène, mort immédiate.

VEMP : Valeur d'exposition moyenne pondérée du RSST.

Selon la littérature, ces gaz atteignent rapidement des concentrations dangereuses après le remplissage du silo. Une heure pourrait suffire pour atteindre des concentrations supérieures à la réglementation en vigueur au Québec. Les concentrations peuvent dépasser 15 % ou 150 000 ppm en CO₂ et 10 ppm en NO₂ (11).

La CSST et l'UPA, soucieuses de cette problématique, ont adressé une demande à l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) pour documenter les gaz de fermentation et rechercher un système de ventilation adéquat, pratique, peu coûteux et adaptable aux silos à fourrage à tour conventionnelle.

Pour répondre adéquatement à cette demande, le processus de fermentation doit être suivi en situation réelle, ce qui implique des travaux en hauteur dans les silos. Ces espaces clos ne sont pas munis d'équipement de protection contre les chutes (travail en hauteur) et le port d'un appareil de protection respiratoire limite grandement les mouvements du technicien effectuant des mesures. Dans un silo, il est difficile de rencontrer les exigences du RSST sur le sauvetage. La présente activité préliminaire vise à valider une alternative de site d'étude correspondant à la

situation réelle, un silo à fourrage de plus de 60 pieds de haut. La présente activité de faisabilité vise en premier lieu la conception d'un mini silo expérimental au laboratoire de l'IRSST. Puis, Ce mini silo permettra d'étudier le comportement des gaz de fermentation sera étudié et comparé les valeurs obtenues aux données de la littérature. Enfin, des essais de ventilation dans ce silo fourniront une base de données utile pour la validation des simulations numériques prévues au projet de recherche 099-557 intitulé Prévention des intoxications dans les silos à fourrage. Le devis de ce projet sera modifié en fonction des résultats de la présente activité.

2. OBJECTIFS DE L'ACTIVITÉ

Les objectifs des travaux de la présente activité préliminaire sont de :

- 1) Définir les paramètres de conception d'un silo à échelle réduite représentatif d'un silo à fourrage à tour conventionnelle.
- 2) Étudier le comportement de la fermentation, qui permettra de valider l'utilisation de silos à échelle réduite dans le projet #099-557 intitulé Prévention des intoxications dans les silos à fourrage.
- 3) Procéder à des essais préliminaires sur les différents modes de ventilation (par aspiration et par dilution) dans un silo à échelle réduite et valider les simulations numériques CFD par Fluent.

3. MÉTHODOLOGIE

3.1 Conception d'un silo à échelle réduite

Le prototype de silo érigé en laboratoire respecte les proportions de grandeur de l'un des modèles de silo à fourrage utilisés par les producteurs québécois. Il reproduit un silo à tour conventionnelle de 18,3 m (60 pieds) de hauteur et d'un diamètre de 6,1 m (20 pieds). Fait de trois tuyaux en ciment utilisés pour les canalisations souterraines et coiffés d'un dôme en matériau transparent, sa hauteur est de 1,67 m (incluant sa base, sans le dôme) et d'un diamètre de 0,54 m. Le silo est représenté à la figure 1.



Figure 1 : Prototype de silo à échelle réduite

La fondation du prototype était constituée de deux plates-formes au-dessus desquelles une membrane en polyéthylène a été étendue et montée, le long de sa structure verticale jusqu'à son sommet. Au-dessus de l'ouverture de la fondation et entre les deux plates-formes, un drain cylindrique avec une membrane filtrante est déposé, afin de récupérer les liquides de l'ensilage (voir Figure 2).



Figure 2 : Vue interne du prototype de silo à échelle réduite

3.2 Fermentation du fourrage

Selon la littérature agroalimentaire et les agronomes de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), le processus de fermentation a pour indicateur l'atteinte d'un pH de 4 en moins de cinq jours et d'une température de la matière ensilée supérieure de 12°C à 15°C à celle de l'air ambiant ainsi que la stabilisation des concentrations des gaz de fermentation. Dans le cadre de cette activité, ces indicateurs servent de repère pour s'assurer que ce processus a eu lieu. Les résultats obtenus permettront d'apporter des correctifs à la conception des silos à échelle réduite afin de répondre aux objectifs du projet 099-557 intitulé Prévention des intoxications dans les silos à fourrage.

Un silo à fourrage est fréquemment rempli de fourrage à 90 % de sa capacité. Afin de correspondre à la réalité, le prototype est rempli à 90 % de sa hauteur avec du maïs épis (tiges et épis hachés) récolté à l'automne 2006. Une analyse préalable de ce fourrage (teneur en matière sèche (MS) et en nitrates) a été effectuée par un laboratoire avec lequel le producteur fait affaire. La régie de la culture (stade de maturité, fertilisation azotée, hauteur de coupe) et les conditions météorologiques avant la coupe ont été documentées auprès du producteur du fourrage utilisé. Ni additif, tel de l'acide propionique (recommandé dans un silo non scellé), ni inoculant bactérien (meilleure stabilité de la fermentation), n'ont été ajoutés dans le silo.

Selon des calculs effectués à partir des données de l'*American Society of Agricultural Engineers* (ASAE), la densité moyenne du fourrage dans un silo à tour conventionnelle d'une hauteur de 60 pieds serait de 285 kg MS/m³ (17,8 lb MS/pi³). Compte tenu que la production de gaz dépend du fourrage, plusieurs paramètres, tels la densité, le tassage dû à la fermentation, la température et le pH de la matière ensilée sont suivis. Selon les agronomes de l'IRDA, l'ensilage dans un silo de 18 m se tasse de 2 à 3 m au cours de la première semaine de la fermentation.

Trois sondes de température (thermocouple), trois instruments pour la mesure d'humidité et du pH, ont été insérés dans l'ensilage à 0,3 m (1 pi) du fond, au centre et à 0,3 m (1 pi) de la surface et ce, vers la partie centrale de la matière ensilée (voir figure 3). Les mesures de pH ont été

effectuées à l'aide d'un pH-mètre de sol utilisé en horticulture de marque Tropical Line. Étant donné que la température ambiante (ensilage d'été versus celui d'automne) est un paramètre influençant la fermentation, les températures ambiantes près du dôme ont été enregistrées.

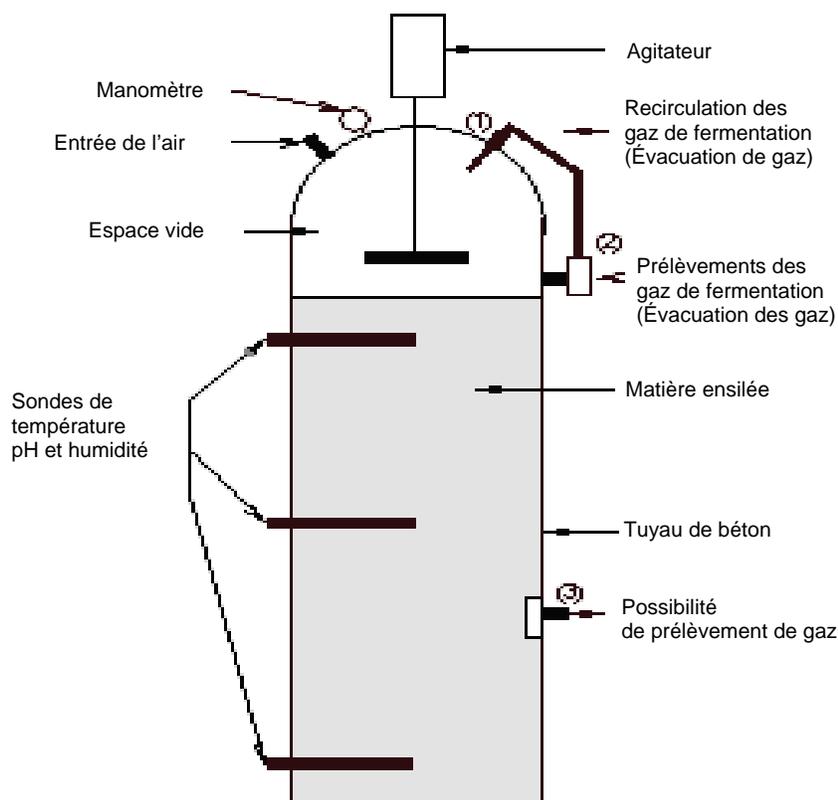


Figure 3 : Schéma du silo à échelle réduite

3.2.1 Méthodologie de prélèvement des gaz de fermentation

Les gaz de fermentation mesurés dans le cadre de cette activité étaient le dioxyde de carbone (CO_2), l'oxyde nitrique (NO), le dioxyde d'azote (NO_2). L'oxygène (O_2) a également été mesuré. Ceux-ci sont identifiés comme ayant été l'agent causal d'intoxication de producteurs ou travailleurs en milieu agricole québécois. De plus, des mesures de protoxyde d'azote (N_2O), d'ammoniac (NH_3) et de sulfure d'hydrogène (H_2S) ont été effectuées. Si la fermentation avait surchauffé, entre autres, ce dernier gaz aurait pu être produit. Tous ces gaz étaient quantifiés à l'aide d'instruments à lecture directe (ILD) ayant l'électrochimie comme système de détection, sauf pour le CO_2 et le N_2O . Ces derniers étaient quantifiés par spectrométrie dans l'infrarouge.

Leur exactitude est de 5 % de la lecture et leur temps de réponse plus ou moins une minute. Les ILD pour la mesure des gaz utilisés sont énumérés au tableau 4.

Tableau 4 : Liste des instruments utilisés pour mesurer les gaz

Gaz mesuré	Marque de l'instrument	Modèle	Plage de mesure	Limite de quantification
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
	Industrial Scientific Corporation (ISC)	ITX	0 – 99,9 ppm	0,1 ppm
CO ₂	Dräger	Multiwarn	0 – 25 %	50 ppm
	Innova	1312	*	1,5 ppm
N ₂ O	Innova	1312	*	0,03 ppm
NH ₃	Industrial Scientific Corporation (ISC)	ITX	0 – 200 ppm	1 ppm
H ₂ S	Industrial Scientific Corporation (ISC)	ITX	0 – 999 ppm	1 ppm

* : Aucune plage de mesure n'est documentée pour l'Innova.

Les prélèvements étaient effectués dans la partie centrale du dôme au-dessus de l'ensilage, deux fois par jour ouvrable (tôt le matin et en fin d'après-midi). Compte tenu du volume de l'espace libre au-dessus de l'ensilage (environ 85 L ou 0,085m³) et de la hauteur de celui-ci (environ 0,254 m ou 10 po), l'équilibre dans l'espace libre au-dessus du fourrage devait être maintenu. À cet effet, une chambre de prélèvement de petit volume, contenant les ILD de marque Dräger et ISC, était installée à proximité du dôme. L'air était aspiré dans la chambre au moyen d'une pompe à un débit d'environ 1 L/min. Le spectromètre dans l'infrarouge de marque Innova était installé en série avec la chambre et prélevait l'air via un T dans la canalisation d'alimentation de la chambre. L'air ainsi prélevé (point 2 de la figure 3) était retourné dans la partie supérieure du dôme (point 1 de la figure 3). Le temps de stabilisation de la chambre et le débit d'aspiration sont des paramètres cruciaux pour le maintien de l'équilibre dans l'espace libre au-dessus de l'ensilage et pour contrôler toute dilution possible de cet espace. La période de fermentation dans un silo à tour conventionnelle est de 21 à 30 jours. Les prélèvements devaient être étalés sur une période minimale de 21 à 30 jours de calendrier et ce, afin de s'assurer de la fin de la période de fermentation en mini silo.

Les prélèvements des gaz de fermentation, des températures, d'humidité et de pH de l'ensilage étaient effectués à tous les jours ouvrables de la période de fermentation. À la fin de la période estimée de fermentation, le silo était ventilé selon la méthodologie décrite plus loin. Compte tenu de la période de l'année, un seul essai était effectué.

3.3 Ventilation des silos

La prémisse de départ est à l'effet que la ventilation par aspiration dans les silos serait plus performante et moins coûteuse que par soufflage, cette aspiration étant située juste au-dessus de la surface de l'ensilage.

À la fin de l'étape, *de la mesure des gaz de fermentation*, une ventilation par aspiration a été pratiquée avant l'ouverture du silo à échelle réduite pour évacuer les gaz de la fermentation. Une conduite installée sur la sortie, équivalente aux évacuations des gaz et située juste au-dessus de la surface de l'ensilage (sortie 2) a servi à brancher un ventilateur qui fonctionnait en régime d'aspiration. Le débit de ventilation a été choisi de façon à respecter la proportionnalité de l'échelle réduite du silo. L'entrée d'air propre s'effectuait par le biais de l'ouverture située en haut du silo (voir figure 2). La mesure des gaz d'ensilage était effectuée dans la conduite d'aspiration durant la ventilation à différentes reprises pour connaître l'évolution des concentrations des gaz de la fermentation présents dans le silo et dans la conduite de ventilation, en fonction du temps d'aspiration. Les intervalles de temps étaient fonction du temps de réponse des instruments pour les prélèvements des gaz. Ces mesures étaient nécessaires pour déterminer le temps de ventilation optimal, dans le but de sécuriser l'environnement interne du mini silo.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les mesures des gaz produits visaient à valider la faisabilité de documenter le processus de fermentation et la technique de ventilation par aspiration et par soufflage dans des silos à échelle réduite.

4.1 Conditions du fourrage

Pour obtenir un compactage équivalent à celui prescrit dans la littérature, 212 kg de maïs épis ayant une teneur de 45% en matière sèche (tiges et épis hachés, figure 4) (± 114 kg MS pour $0,4$ m³) a été nécessaire.



Figure 4 : Fourrage utilisé : maïs épis

4.2 Fermentation du fourrage

Après son remplissage et son compactage, des mesures de la concentration des gaz d'ensilage dans l'espace libre, du pH, de la température et de l'humidité du fourrage ont été effectuées au cours des cinq à six semaines suivant le remplissage du prototype. Au cours des trois premières semaines, la température de l'ensilage était relativement stable et un peu plus élevée que la température ambiante dans le laboratoire; elle variait entre 21 et 24 °C (du bas vers le haut du silo), celle du laboratoire de 19 à 20 °C. Le pH était d'environ 7 aux trois niveaux de l'ensilage, en bas, au milieu et près de la surface de l'ensilage. Le fonctionnement des pH-mètres a été vérifié en les insérant dans le sol de plantes. La grande porosité de la matière ensilée induisait probablement une mauvaise conductivité et les pH-mètres ne pouvaient pas mesurer adéquatement le pH de celle-ci.

La présence d'une faible quantité d'O₂ (de l'ordre de 10 %), une génération de 10 % de CO₂ et l'absence d'oxydes d'azote (NO_x) étaient observées. D'après ces résultats, la fermentation n'aurait pas eu lieu. L'absence de H₂S indiquait que le fourrage ne compostait pas. Seize jours après le remplissage du prototype, la structure du silo a été chauffée, afin d'être plus représentative de la température ambiante estivale de jour. À cet effet, un chauffage électrique et une bâche en plastique ont été installés. La température de la matière ensilée a alors atteint une température supérieure à 30 °C. Cependant, le pH restait stable autour de 7. Les moyennes des concentrations des gaz de fermentation étaient les suivantes :

9,7 % de CO₂

9,3 % de O₂

Absence de NO (lecture non significative 0,5 ppm)

Absence de NO₂.

Les mesures du NO sont non significatives, car elles sont sous la limite de quantification du système de détection, électrochimie. Ceci s'explique par la faible teneur en nitrate du fourrage qui a été coupé tard en saison (10 octobre 2006) après une longue période de sécheresse et de chaleur. La concentration de CO₂ était d'environ 10 % et les concentrations d'O₂ augmentaient. À moins que la fermentation génère une pression négative dans le silo autrement des fuites impliquent un équilibre des concentrations de gaz entre l'intérieur du silo et l'air extérieur

Le prototype a été ouvert à la sixième semaine, afin de prélever des échantillons pour des analyses externes au Centre de Recherche en santé animale de Deschambeault (CRSAD). Avant son ouverture, un échantillon a été prélevé dans l'espace libre afin de détecter par colorimétrie la présence ou l'absence d'acide acétique. Un autre prélèvement dans l'ensilage (point 3 de la figure 3) a été effectué afin d'analyser les gaz présents dans l'ensilage. Les résultats de ces analyses ont montré l'absence d'acide acétique dans l'espace libre du mini silo (pas de changement de coloration (du rose au jaune) sur le tube colorimétrique).

À l'ouverture, l'ensilage avait baissé de 16 cm, abaissement similaire à ce qui a été prescrit par les responsables de l'IRDA. Des prélèvements à différents niveaux de l'ensilage (au nombre de 3) ont été effectués pour une analyse de la composition de l'ensilage. Les résultats de ces analyses effectuées par le CRESAD sont présentés au tableau 6. Ils montrent qu'il y a eu fermentation au cours des six semaines après le remplissage du prototype.

Tableau 5 : Résultats des analyses d'ensilage

	pH	MS (%)	Sucres (g/100g)	Acide lactique (g/100g)	Acide acétique (g/100g)	Ammoniac (%)
1	3,8	40,63	0	3,84	0,78	0,07
2	3,8	39,23	0	3,73	0,79	0,07
3	4,3	43,96	0,82	1,99	0,58	0,06

MS : Matière sèche

Après ces prélèvements, le silo a été refermé et scellé. Les concentrations des gaz dans l'espace libre au-dessus de la matière ensilée étaient équivalentes à celles énoncés précédemment : 9,3 % d'O₂ et environ 9,7 % en CO₂ avec une absence de NO.

À la septième semaine (une semaine après l'ouverture), des mesures de CO₂ ont été effectuées à différents endroits autour du silo, afin de déceler des fuites : à sa base dans le drain de la fondation, aux trois niveaux de l'ensilage où les sondes thermiques et les électrodes des pH-mètres étaient installées et au sommet où se trouve le dôme. Les concentrations mesurées de CO₂ sont :

- Air ambiant du laboratoire : 394 ppm
- Dôme : 510 ppm
- Point 1 (figure 3) : 419 ppm
- Point 2 (figure 3) : 783 ppm et 511 ppm
- Point 3 (figure 3) : 545 ppm
- À l'intérieur du drain : 2 900 ppm.

Étant donné la grande masse de l'ensilage et les dimensions élevées des silos réels à tour conventionnelle de 60 pieds, les fuites potentielles seraient moins significatives en comparaison de celles du silo à échelle réduite utilisé dans cette activité. Les fuites suspectées n'ont pas empêché le processus de fermentation de se produire, car la partie centrale était anaérobie. D'après les résultats, elles auraient entraîné une chute de la concentration du CO₂ et la présence d'O₂ dans l'espace libre au-dessus du fourrage. Cependant, compte tenu de la grande quantité de matière à fermenter dans les silos réels, les concentrations des gaz de fermentation seraient plus élevées, selon la littérature (10), que celles obtenues dans cette activité préliminaire.

4.3 Résultats expérimentaux de la ventilation et interprétations

Dans le cadre de cette activité préliminaire, dans un premier temps, la ventilation par aspiration a été testée et comparée avec des simulations 3D en utilisant le logiciel commercial Fluent. Ensuite, les deux modes de ventilation par aspiration et par soufflage ont été comparés expérimentalement pour un débit de ventilation 20 L/min et un volume de l'espace libre d'environ 100 L.

À la fin de la fermentation, un test de ventilation par aspiration a été effectué. Une conduite installée sur la sortie équivalente aux évacuations des gaz et située juste au-dessus de la surface de l'ensilage (voir figure 5-a) a servi à brancher un ventilateur, qui fonctionnait en régime d'aspiration. Le débit de ventilation (20 L/min) a été choisi de façon à respecter la proportionnalité du silo à échelle réduite. L'entrée d'air propre s'est effectuée par le biais de l'ouverture située au sommet de celui-ci. De plus, la mesure de la concentration du dioxyde de carbone s'est effectuée dans la conduite d'aspiration, durant la ventilation, à différentes reprises pour connaître l'évolution de la concentration des gaz d'ensilage, en fonction du temps d'aspiration. Ces mesures étaient nécessaires pour déterminer le temps optimal de ventilation pour atteindre des concentrations minimales des gaz à l'intérieur du silo. Le temps de ventilation, ΔT , par aspiration a été d'environ 20 minutes. Les mesures des gaz CO₂ et O₂ durant la ventilation par aspiration ont été comparées par des simulations (CFD) effectuées à l'aide du logiciel commercial Fluent.

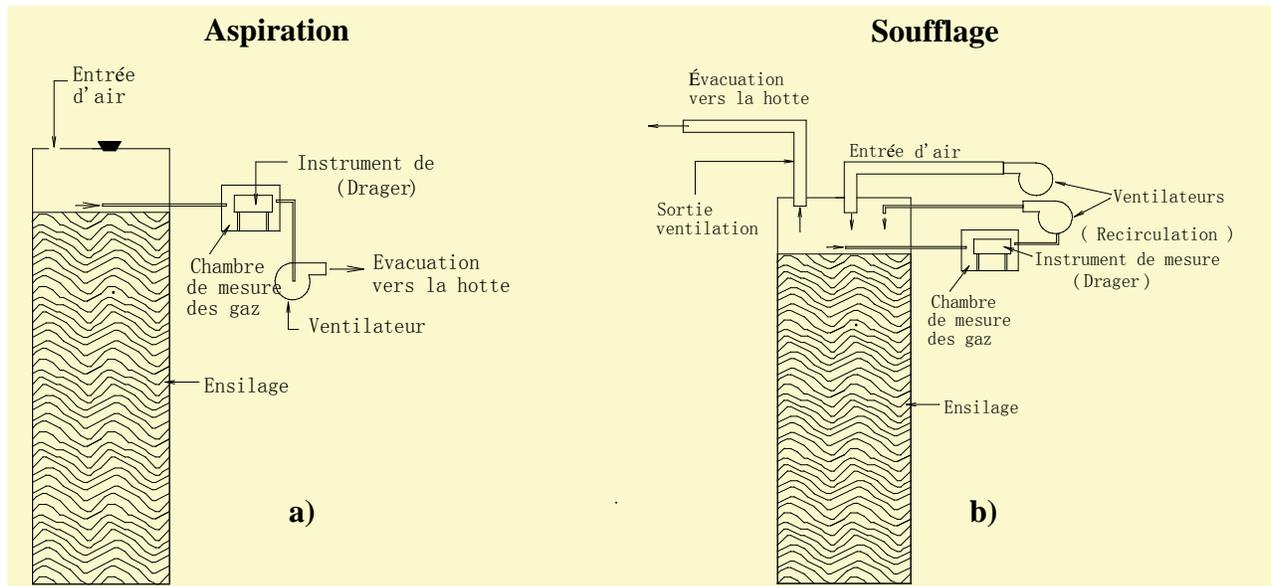


Figure 5 : Schéma des dispositifs utilisés pour la ventilation

a) par aspiration ; b) par soufflage

Après ce premier test, le silo était fermé chaque nuit et les fins de semaine, les émissions des gaz d'ensilage emmagasinés dans le fourrage ont permis d'obtenir des concentrations initiales de 10% de CO₂ et de 10 % de O₂ dans l'espace libre. Ces gaz ont été utilisés comme gaz traceurs pour tester les deux modes de ventilation, par aspiration et par soufflage, puis comparés l'un à l'autre. Le dispositif de ventilation par soufflage est décrit dans la figure 5-b).

4.3.1 Démarche expérimentale permettant de déterminer le temps de ventilation et résultats expérimentaux

Chaque jour, un test de ventilation par aspiration ou par soufflage a été effectué. Nous avons mesuré à chaque fois, pendant une vingtaine de minutes, jusqu'à stabilité, la concentration du dioxyde de carbone (qui était toujours d'environ 10 % de CO₂) avant la ventilation et ce, à l'aide d'un instrument de marque Dräger (pile électrochimique, voir tableau 5). Ensuite, nous avons ventilé à un débit de 20 L/min. L'air du milieu extérieur s'introduisait dans le silo à travers une ouverture située au sommet de celui-ci. L'analyse des gaz était effectuée au cours de la ventilation, en passant à travers une chambre où se trouvait l'instrument. La ventilation était arrêtée, quand les concentrations de CO₂ et de O₂ étaient stabilisées. Les concentrations stables obtenues après la ventilation étaient les suivantes :

1 % de CO₂

20 % de O₂

Les mesures des gaz durant la ventilation ont été transférées dans un ordinateur puis mises dans un format graphique où une courbe montrait l'évolution des concentration du gaz carbonique et de l'oxygène dans le temps. Après la phase de la fermentation, le temps de ventilation par aspiration détecté a été d'environ 20 minutes. On a noté le temps final de ventilation, dès que la concentration en O₂ a atteint 99 % de saturation en oxygène (voir Figure 6).

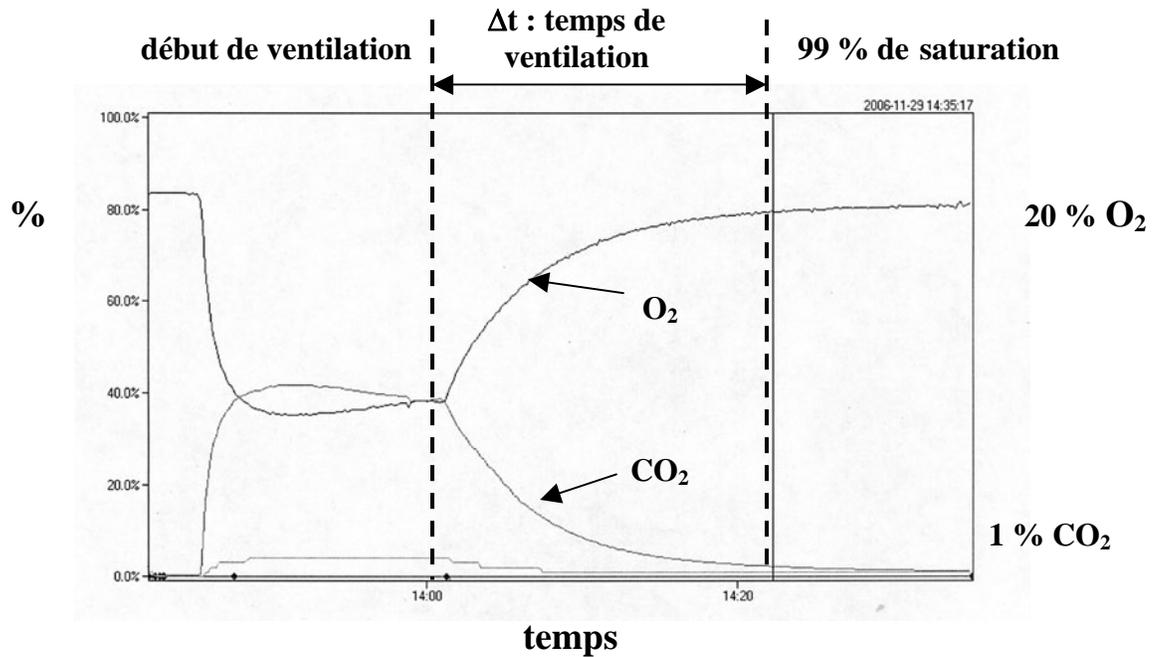


Figure 6 : Évolutions du O₂ et de CO₂ durant la ventilation par aspiration

Nous avons remarqué aussi que, lorsque les tests de ventilation étaient terminés et que le silo était refermé, la concentration de gaz carbonique revenait à presque 10 % après quelques heures (4 heures) (Figure 7). Par conséquent, l'arrêt de la ventilation durant le travail ne serait pas recommandé. En effet, les gaz d'ensilage étant toujours emprisonnés dans l'ensilage, ils diffuseraient toujours dans l'espace libre du silo. En plus des gaz d'ensilage emprisonnés, le processus bactérien aérobie serait à nouveau actif (suite à la présence d'oxygène dans le silo), ce qui entraînerait toujours la production de gaz carbonique.

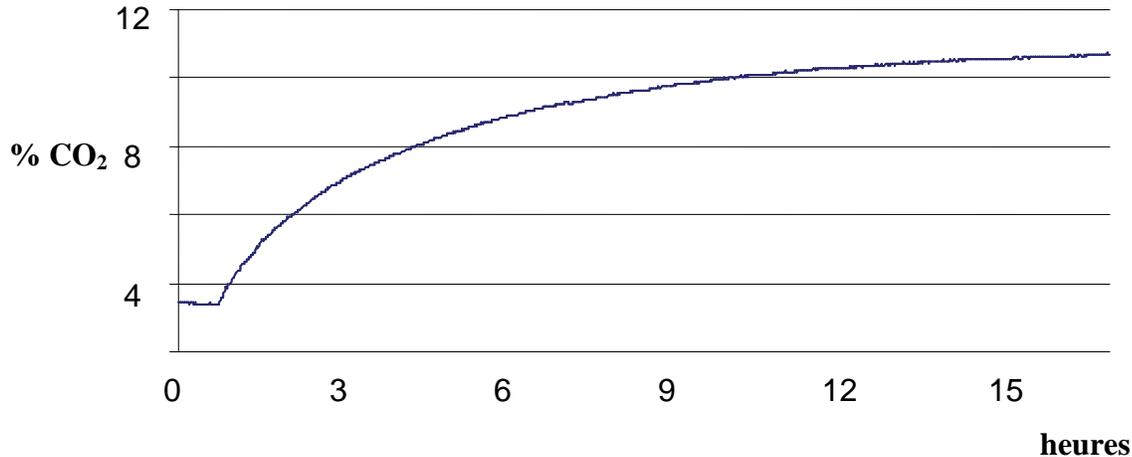


Figure 7 : Évolution du CO₂ dans le silo après l'arrêt de ventilation

4.3.2 Interprétations des résultats expérimentaux des tests de ventilation

Les tests de ventilation prouvent que le danger associé à la respiration des gaz asphyxiants ou toxiques est réduit. Toutefois, le risque d'intoxication demeure présent dès l'arrêt de la ventilation, à cause du CO₂ émis par l'ensilage. Les résultats de cette étude incitent à sensibiliser les agriculteurs sur l'insécurité de travailler dans le silo, étant un milieu clos, sans ventilation. La ventilation permet de réduire les gaz d'ensilage dans l'espace libre du silo. L'arrêt de la ventilation entraîne une augmentation rapide de la concentration des gaz d'ensilage dans l'espace libre du silo. Ces gaz prennent la place de l'oxygène et rendent l'espace libre du silo pauvre en oxygène. Il est alors recommandé de laisser la ventilation en fonctionnement avant et pendant les travaux dans le silo.

4.3.3 Comparaison des résultats expérimentaux et théoriques

Cette partie consistait, par le biais du code commercial CFD 'Fluent', à simuler numériquement, dans une configuration tridimensionnelle (similaire à celle du silo), l'effet de la ventilation par aspiration dans le silo, en utilisant le dioxyde de carbone comme gaz traceur. Les résultats des simulations numériques sont en très bon accord avec ceux obtenus via le test expérimental de ventilation par aspiration dans le silo (Figure 8).

Cette première validation des simulations numériques, en utilisant le test de ventilation par aspiration dans le silo laboratoire, est très encourageante pour la suite. D'autres tests seront nécessaires pour une confirmation scientifique. Ces tests feront l'objet d'une partie de projet sur

la prévention des intoxications dans les silos à fourrage. Ils permettraient d'utiliser en toute confiance les calculs par simulation (CFD) pour étudier les paramètres de ventilation et les différentes situations associées à la problématique des silos à tour conventionnelle en milieux agricoles.

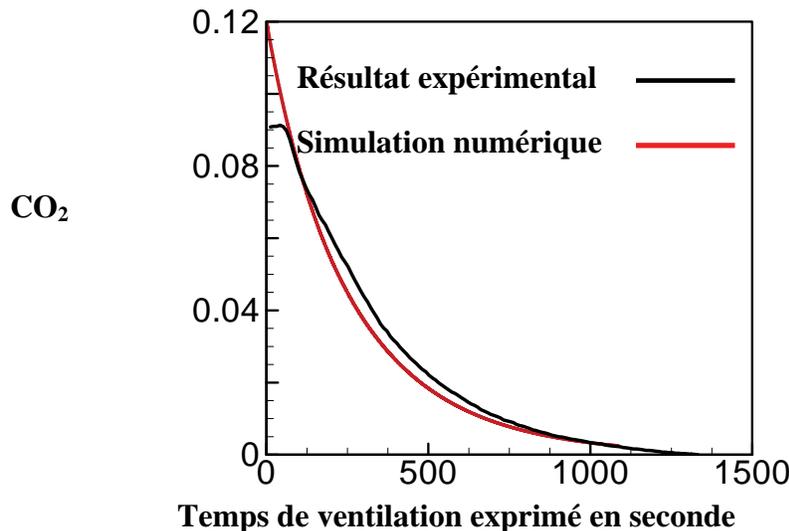


Figure 8 : Évolution du CO₂ durant la ventilation par aspiration

4.3.4 Comparaison expérimentale des deux modes de ventilation par aspiration et par soufflage

Les modes de ventilation par aspiration et par soufflage ont été comparés pour un seul cas (débit de ventilation de 20 L/min et un volume d'espace libre de 100 L). Le soufflage a été effectué à deux hauteurs par rapport à la surface d'ensilage (15 mm et 309 mm). La figure 9 présente une comparaison des modes de ventilation par soufflage et par aspiration. Cette figure illustre le temps de ventilation en fonction de la concentration initiale de l'oxygène.

La ventilation par soufflage est plus performante quand le soufflage s'effectue plus loin de la surface d'ensilage. Ceci se traduit par une diminution du temps de ventilation lorsque le soufflage s'effectue à 309 mm de la surface d'ensilage par rapport à celui du soufflage tout près de l'ensilage (à 15 mm). Le temps de la ventilation dépend des concentrations initiales des gaz présents dans l'espace à ventiler. Il augmente avec la concentration initiale des gaz d'ensilage dans le silo. Le temps de ventilation par aspiration est plus court par rapport à celui de soufflage. Ces résultats préliminaires sont obtenus pour un seul cas. Leur validation scientifique nécessiterait des études expérimentales et théoriques approfondies où plusieurs configurations et conditions devraient être élaborées. Ceci fera l'objet d'une partie du travail à effectuer au cours du projet 099-557 intitulé Prévention des intoxications dans les silos à fourrage.

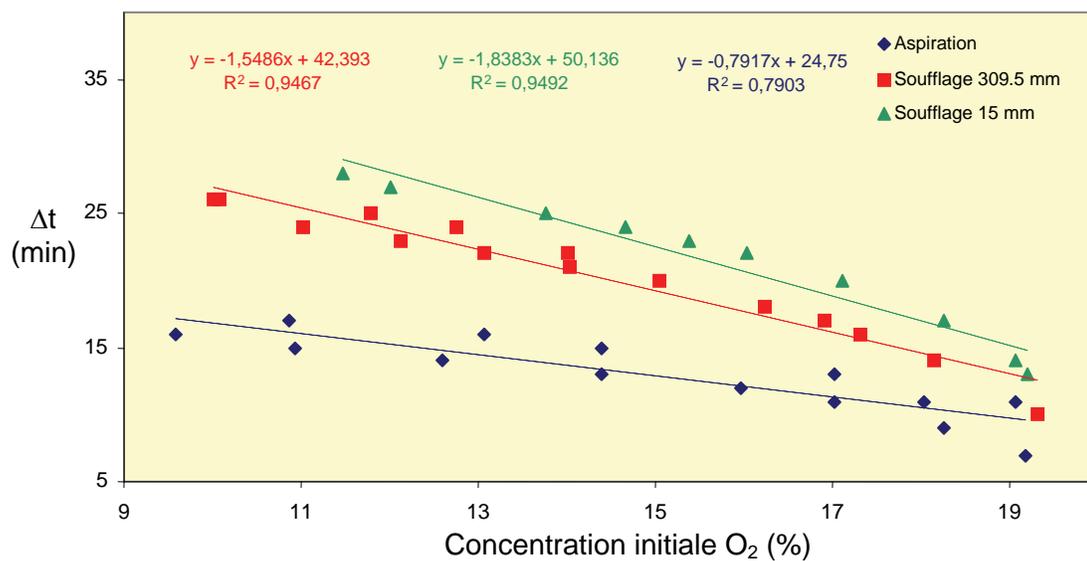


Figure 9 : Temps de ventilation par aspiration et soufflage en fonction de la concentration initiale de O_2 .

4.4 Modifications apportées au projet Prévention des intoxications dans les silos à fourrage

Les résultats présentés dans le présent rapport d'activité préliminaire ont permis d'apporter des modifications à la méthodologie du devis du projet 099-557 intitulé Prévention des intoxication dans les silos à fourrage. Voici donc les principales modifications et observations en ce qui a trait à la conception des silos à échelle réduite :

- 1) L'instrument de mesure du pH utilisé dans cette activité n'était pas adapté pour la situation. Il a alors été écarté dans la méthodologie du projet.
- 2) La densité a été conforme aux données des ASAE de 1997. Le tassage de la matière ensilée attendu au cours de la fermentation devait être d'environ 0,17 à 0,25 m, estimation conforme à ce qui est rapporté par les experts de l'IRDA et du MAPAQ. La densité et la nature du fourrage sont des facteurs déterminants, qui ont été pris en compte dans la méthodologie corrigée du projet #099-557.
- 3) La concentration du gaz carbonique et de l'oxygène est demeurée toujours à environ 10 % (respectivement 12 % par rapport à 0,04 % et 20,9 % dans l'air ambiant). La littérature (6) rapporte des concentrations de CO₂ de l'ordre de 60 %, lors de la fermentation et une faible concentration de O₂. Ce point sera corrigé, lors de la réalisation du projet #099-557.
- 4) Le NO₂ n'a pas été mesuré, car une longue période de sécheresse, notamment, a précédé la coupe du fourrage. Cette période a réduit la quantité d'azote dans le plant. Après 42 jours de fermentation, l'ensilage a été analysé par les laboratoires du CRSAD. Ces résultats ont démontré que le processus de fermentation a eu lieu.
- 5) L'étude #099-557 couvrira **quatre récoltes** (juin, juillet, août et maïs épis de septembre) au cours de deux étés successifs (2007 et 2008). Les essais effectués au cours du deuxième été élargiront la gamme de situations, quant à des conditions climatiques variées et à la présence de différents fertilisants, notamment.

5. CONCLUSION

En résumé, les résultats de cette activité préliminaire seront pris en considération pour apporter des modifications à la méthodologie du devis du projet 099-557 intitulé Prévention des intoxications dans les silos à fourrage. Les silos à échelle réduite équivalents à deux formats de silos grandeur nature seront fermés à la base et enfouis dans le sol afin qu'aucune fuite de gaz ne soit possible. Aucune modification n'a été apportée à la méthodologie relative à la section «ventilation» dans le devis.

La comparaison des simulations numériques, en utilisant le test de ventilation par aspiration dans le silo laboratoire, est très encourageante. Une fois validé avec d'autres tests expérimentaux, les calculs par simulation (CFD) pourraient être un outil pratique pour étudier les paramètres de ventilation et les différentes situations associées à la problématique des silos à tour conventionnelle en milieux agricoles.

6. RÉFÉRENCES

- (1) Gouvernement du Québec. *Règlement sur la santé et la sécurité du travail*. Gazette officielle du Québec, Décret 885-2001, 2001.
- (2) J. Schrottmaier, *Protection from silo gas*. Ergonomics, 25(1), 89-105, 1982.
- (3) G. K. Smith, *Carbon dioxide, caves and you*. <http://wasg.iinet.net.au/Co2paper.html>, 1997.
- (4) F. A. Patty, *Industrial Hygiene and Toxicology*. Vol. 2C, 3rd edition, 1963.
- (5) A. G. Meiering M.G. Courtin, S. F. Spoelstra, G. Pahlow, H. Honig, R. E. Subden et E. Zimmer, *Fermentation kinetics and toxic gas production of silage*. Tran. Am. Soc. Agric. Eng., 31(2), 613-621, 1988.
- (6) W. S. Reid, J. E. Turnbull, H. M. Sabourin et M. Ihnat, *Silo gas : Production and detection*. Can. Agric., Eng. 26(2), 197-207, 1984.
- (7) B. M. Paragon, *Bonnes pratiques de fabrication de l'ensilage pour une meilleure maîtrise des risques sanitaires*. afssa, 1-118, 2004.
- (8) M. Legris, *Gaz d'ensilage*. Travail et santé, 17(2), 46-51, 2001.
- (9) INRS, *Intoxication par inhalation de dioxyde de carbone*. Dossier médico-technique, 79, 3^e trimestre, France, 1999.
- (10) W. S. Reid, J. E. Turnbull, H. M. Sabourin and M. Ihnat, *Silo Gas: Production and detection*. Can. Agr. Eng., 36(2), 197-207, 1984.
- (11) ACGIH, *TLV.s threshold limit values for chemical substances and physical agents in the workroom environment, with intended changes for 1980*. Am. Conf. Of Govt. Ind. Hygienists, Airborne Contaminants Committee, P. O. Box 1937, Cincinnati, Ohio, 1980.