

RAPPORT D'ENQUÊTE

**Accident mortel survenu à [A],
le 27 juillet 2019, à la ferme Melga inc.
située au 822, chemin Chamberlain, Dixville (Québec)**

**Service de prévention-inspection Estrie
Direction de la prévention-inspection Sud-Est**

VERSION DÉPERSONNALISÉE

Inspecteurs :

_____ **Sylvain Roy, ing.**

_____ **Sébastien Thellend**

Date du rapport : 21 avril 2020

Rapport distribué à :

- Monsieur [B], [...], Ferme Melga
- Monsieur Richard Drapeau, coroner
- Docteur Alain Poirier, directeur de la santé publique de l'Estrie

TABLE DES MATIÈRES

<u>1</u>	<u>RÉSUMÉ DU RAPPORT</u>	<u>1</u>
<u>2</u>	<u>ORGANISATION DU TRAVAIL</u>	<u>2</u>
2.1	STRUCTURE GÉNÉRALE DE L'ÉTABLISSEMENT	2
2.2	ORGANISATION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ DU TRAVAIL	2
2.2.1	MÉCANISMES DE PARTICIPATION	2
2.2.2	GESTION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ	2
<u>3</u>	<u>DESCRIPTION DU TRAVAIL</u>	<u>3</u>
3.1	DESCRIPTION DU LIEU DE TRAVAIL	3
3.2	SILO TOUR CONVENTIONNEL EN ACIER VITRIFIÉ	4
3.3	DESCRIPTION DU TRAVAIL À EFFECTUER	6
3.4	PROCESSUS D'ENSILAGE ET DE FERMENTATION	7
<u>4</u>	<u>ACCIDENT : FAITS ET ANALYSE</u>	<u>9</u>
4.1	CHRONOLOGIE DE L'ACCIDENT	9
4.2	CONSTATATIONS ET INFORMATIONS RECUEILLIES	10
4.2.1	LA RÈGLEMENTATION APPLICABLE AU TRAVAIL DANS UN ESPACE CLOS	11
4.2.2	LA NORME CANADIENNE CSA-Z1006-16 : GESTION DU TRAVAIL DANS LES ESPACES CLOS	14
4.2.3	LA RÈGLEMENTATION APPLICABLE À LA PROTECTION CONTRE LES CHUTES	15
4.2.4	RAPPORT D'EXPERTISE DE LA COMMISSION DES NORMES, DE L'ÉQUITÉ, DE LA SANTÉ ET SÉCURITÉ DU TRAVAIL (CNESST)	15
4.2.5	RAPPORT D'EXPERTISE FIRME BBA	18
4.2.5.1	Vitesse de l'air à la surface de l'ensilage sans déflecteur (sans obstacle)	18
4.2.5.2	Vitesse de l'air à la surface de l'ensilage avec déflecteur	19
4.2.5.3	Efficacité de la ventilation (dilution par soufflage)	19
4.2.5.4	Évaluation du temps de ventilation nécessaire	21
4.2.5.5	Pressurisation du silo	21
4.3	ÉNONCÉS ET ANALYSE DES CAUSES	22
4.3.1	L'ARRIVÉE DE GAZ ASPHYXIANTS DANS LA ZONE RESPIRATOIRE DU [A] PROVOQUE SA PERTE DE CONSCIENCE ET ENGENDRE SA CHUTE LIBRE D'UNE HAUTEUR D'ENVIRON 21 M.	22
4.3.2	LA PROCÉDURE CONSISTANT UNIQUEMENT À VENTILER LE SILO À L'AIDE DU SOUFFLEUR À FOURRAGE AVANT D'Y ENTRER EST INSUFFISANTE POUR ASSURER LA SÉCURITÉ DU TRAVAILLEUR.	23

5	<u>CONCLUSION</u>	24
5.1	CAUSES DE L'ACCIDENT	24
5.2	AUTRES DOCUMENTS ÉMIS LORS DE L'ENQUÊTE	24
5.3	SUIVIS DE L'ENQUÊTE	24
 <u>ANNEXES</u>		
ANNEXE A :	Accidenté	25
ANNEXE B :	Liste des témoins et des autres personnes rencontrées	26
ANNEXE C :	Rapport d'expertise de la CNESST	27
ANNEXE D :	Rapport d'expertise de BBA	38
ANNEXE E :	Références bibliographiques	66

INDEX DES FIGURES

Figure 1 : Scène de l'accident.....	1
Figure 2 : Lieu du travail.....	3
Figure 3 : Silo tour conventionnel en acier vitrifié	4
Figure 4 : Videur muni d'un déflecteur.....	5
Figure 5 : Déflecteur	5
Figure 6 : Vue extérieure et intérieure de la chute du silo	6
Figure 7 : Phases de fermentation de l'ensilage.....	7
Figure 8 : Silo-tour typique à déchargement par le haut après le remplissage	8
Figure 9 : Croquis du silo tour conventionnel en acier vitrifié n° 2 au moment de l'accident	10
Figure 10 : Effet d'une diminution des teneurs en O ₂	16
Figure 11 : Schéma du silo tour n° 2 montrant les volumes estimés de CO ₂ avant l'accident	17
Figure 12 : Évolution du rapport U_x / U_o en fonction de la distance X / D	18

SECTION 1**1 RÉSUMÉ DU RAPPORT****Description de l'accident**

Le 27 juillet 2019, après avoir respiré des gaz toxiques d'ensilage en ouvrant une porte menant à l'intérieur du silo tour conventionnel en acier vitrifié n° 2, [A] de la ferme Melga inc. chute d'une hauteur d'environ 21 mètres sur une structure métallique au niveau du sol.

Conséquences

[A] décède.



Figure 1 : Scène de l'accident
(Source : CNESST)

Abrégé des causes

Les causes suivantes sont retenues pour expliquer cet accident :

- L'arrivée de gaz asphyxiants dans la zone respiratoire du [A] provoque sa perte de conscience et engendre sa chute libre d'une hauteur d'environ 21 m.
- La procédure consistant uniquement à ventiler le silo à l'aide du souffleur à fourrage avant d'y entrer est insuffisante pour assurer la sécurité du [A].

Mesures correctives

Une décision est rendue sur les lieux afin d'interdire l'accès à l'intérieur des silos et à leur chute situés sur la ferme Melga inc. Une procédure d'entrée en espace clos est exigée avant que le travail ne puisse reprendre. Le rapport d'intervention RAP1273834 daté du 5 août 2019 fait état de l'intervention effectuée.

Le présent résumé n'a pas de valeur légale et ne tient lieu ni de rapport d'enquête, ni d'avis de correction ou de toute autre décision de l'inspecteur. Il constitue un aide-mémoire identifiant les éléments d'une situation dangereuse et les mesures correctives à apporter pour éviter la répétition de l'accident. Il peut également servir d'outil de diffusion dans votre milieu de travail.

SECTION 2

2 ORGANISATION DU TRAVAIL

2.1 Structure générale de l'établissement

L'établissement Ferme Melga inc. est une ferme laitière exploitée depuis quatre générations. La ferme est détenue par monsieur [A] et [...], monsieur [C], monsieur [D] et monsieur [A] ([...] décédé). L'entreprise emploie environ [...] travailleurs à temps partiel. La supervision du personnel est assurée par les quatre copropriétaires.

L'employeur est membre de l'Union des producteurs agricoles (UPA) et de l'organisation Les producteurs de lait du Québec.

2.2 Organisation de la santé et de la sécurité du travail

2.2.1 Mécanismes de participation

Il n'y a aucun mécanisme structuré de participation. Les problématiques sont gérées par les copropriétaires lorsqu'elles surviennent.

2.2.2 Gestion de la santé et de la sécurité

Il n'y a pas de structure formelle relative à la gestion de la santé et de la sécurité du travail. La formation des nouveaux travailleurs s'effectue par accompagnement et observation.

SECTION 3

3 DESCRIPTION DU TRAVAIL

3.1 Description du lieu de travail

L'entreprise se spécialise dans la production laitière et elle possède un troupeau bovin d'environ 450 têtes, dont 230 vaches en lactation. L'entreprise possède quelque 1000 hectares de terrain, dont environ 750 hectares sont des terres cultivables. La balance étant des pâturages et de la forêt, dont une érablière d'environ 3500 entailles. La ferme comporte plusieurs bâtiments, dont une laiterie, trois étables, trois garages pour la machinerie, une cabane à sucre, deux fosses à purin et onze silos. Parmi les silos présents, on compte cinq silos tours conventionnels en acier vitrifié, un silo tour conventionnel en douves de béton et cinq silos à grain en acier galvanisé.

Pour le remplissage des silos, un souffleur est relié à un conduit métallique fixé à la paroi extérieure de chacune des structures. Au moment de la récolte, la matière végétale est hachée puis transportée à l'aide de remorques à ensilage jusqu'au silo afin d'être déversée dans le souffleur. Le tout est alors soufflé à l'intérieur des silos.



Figure 2 : Lieu du travail
(Source : CNESST)

3.2 Silo tour conventionnel en acier vitrifié

Selon le fournisseur, Silo J.M. Lambert inc., le silo tour en acier vitrifié (voir Figure 3) de marque Harvestore Product inc., était, à l'origine, un silo hermétique. Celui-ci a été converti par le fournisseur en un silo conventionnel, c'est-à-dire ouvert à l'atmosphère. L'employeur l'a acquis du fournisseur en 2013. Ce silo a un diamètre interne d'environ 7,6 m et sa hauteur est d'environ 30,5 m. Il est composé de 20 sections circulaires superposées d'acier vitrifié et disposées sur une base de béton. Chaque section mesure 1,4 m de haut. À l'intérieur de la chute, chacune des sections est munie d'une porte donnant accès à l'intérieur du silo. Chaque porte mesure 0,54 m par 0,65 m. La toiture mesure 1,44 m de haut. Sur la paroi extérieure du silo se trouve une canalisation métallique servant à souffler l'ensilage à l'intérieur du silo via une ouverture au sommet de la toiture de celui-ci.



Figure 3 : Silo tour conventionnel en acier vitrifié
(Source : CNESST)

Une échelle extérieure munie d'une crinoline donne accès à une plate-forme située en haut du silo, ainsi qu'à la toiture de la structure. Au niveau de cette plate-forme, une porte ayant les mêmes dimensions que celles de la chute donne accès à l'intérieur du silo. Elle est utilisée pour manutentionner du matériel et pour vérifier le niveau de l'ensilage à l'intérieur du silo afin de déterminer la quantité de matière à ajouter.

À l'intérieur du silo est installé un videur de marque Valmétal. Lors du remplissage du silo, le videur est remonté sous la toiture et il sert à distribuer l'ensilage uniformément à l'aide d'un déflecteur par rotation de l'appareil autour de l'axe vertical central (voir Figure 4). Pour l'alimentation du troupeau, le videur est descendu à la surface de l'ensilage. Une vis racleuse amène alors l'ensilage vers un petit souffleur, au centre, qui l'achemine à son tour dans un conduit longeant la chute.

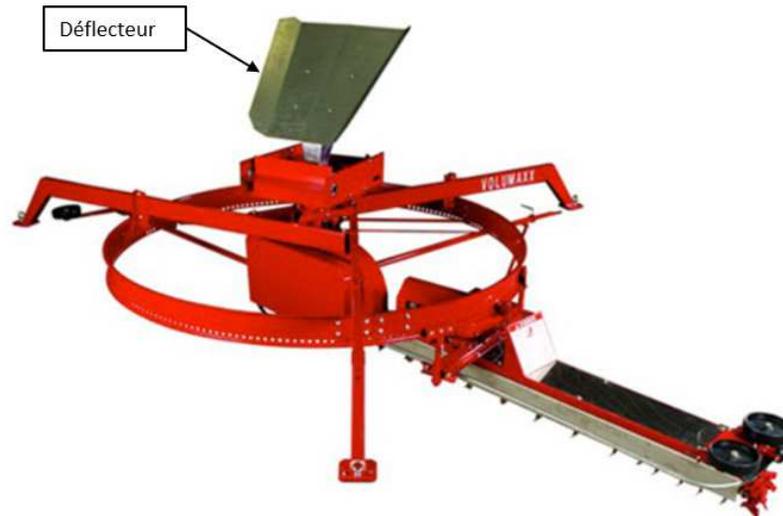


Figure 4 : Videur muni d'un déflecteur

(Source : Site internet de « Silo J.M. Lambert »)

Le déflecteur (voir Figure 5) est disposé directement au centre, sous l'entrée de l'ensilage (ou de l'air frais), à une distance de 1,81 m avec un angle d'inclinaison de 45°.

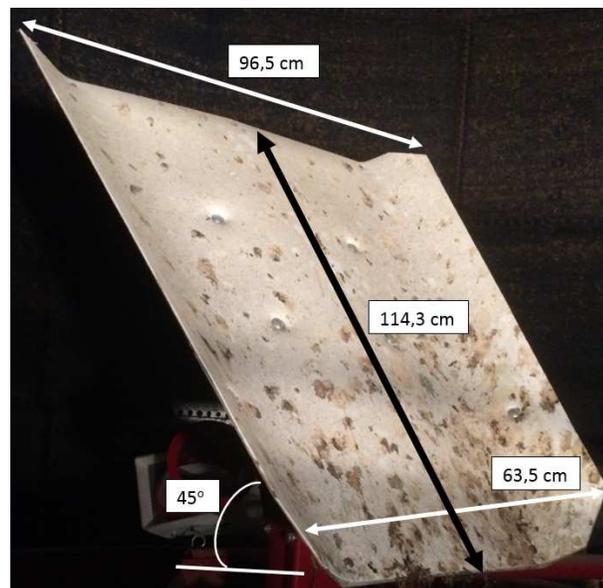


Figure 5 : Déflecteur

(Source : CNESST)

3.3 Description du travail à effectuer

Lors de la récolte, afin de produire de l'ensilage, la luzerne est hachée puis transportée à l'aide de remorques à ensilage jusqu'au silo à remplir. Au moment du remplissage, le souffleur est relié au conduit métallique fixé à la paroi extérieure. La luzerne est ainsi soufflée à l'intérieur du silo. Dès lors débute le processus de fermentation.

Pendant le soufflage de la luzerne à l'intérieur du silo, le videur, situé au sommet et muni d'un dispositif de distribution de l'ensilage (déflecteur), tourne sur son axe central vertical afin de répartir le matériel dans le silo. Avec cette méthode de remplissage, un monticule en forme d'anneau (voir Figure 8) se crée à la surface de l'ensilage à l'intérieur du silo.

Après le remplissage, la tâche à effectuer consiste à monter par l'échelle située dans la chute (voir Figure 6), ouvrir la porte d'accès située juste au-dessus du niveau de l'ensilage et entrer à l'intérieur du silo afin de niveler l'ensilage à l'aide d'une fourche. Lorsqu'il est décidé de laisser fermenter complètement l'ensilage, une toile et des boudins sont placés sur l'ensilage une fois le nivelage terminé. Ceci permet de réduire l'exposition de la luzerne à l'oxygène et de préserver la qualité de l'ensilage. Ces tâches sont, normalement, exécutées par deux personnes.



Figure 6 : Vue extérieure et intérieure de la chute du silo

(Source : CNESST)

3.4 Processus d'ensilage et de fermentation

L'ensilage est un processus de fermentation acide du matériel végétal qui se déroule en conditions anaérobiques, soit en l'absence d'oxygène (O₂). Selon le document *M-7410 Gaz d'ensilage* de Canada service de plans, après la coupe et le hachage des plants dans les champs et leur soufflage dans le silo, lors d'une première phase qui dure environ une journée, les plantes épuisent rapidement la quantité de O₂ atmosphérique emprisonnée dans la masse compactée. Pendant ce processus de respiration, l'O₂ est transformé en eau et en dioxyde de carbone (CO₂), l'atmosphère devient alors appauvrie en O₂. Durant la deuxième phase, des microbes anaérobiques producteurs d'acides se multiplient rapidement dans l'ensilage tiède et humide. Ils se nourrissent d'une partie des sucres et de l'amidon contenus dans l'ensilage en les transformant en acides (lactiques, acétiques, etc.). Ces bactéries acidogènes produisent encore davantage de CO₂. La figure 7 montre les principales phases de fermentation de l'ensilage; la phase de stabilité est généralement atteinte après une période de 21 jours de fermentation.

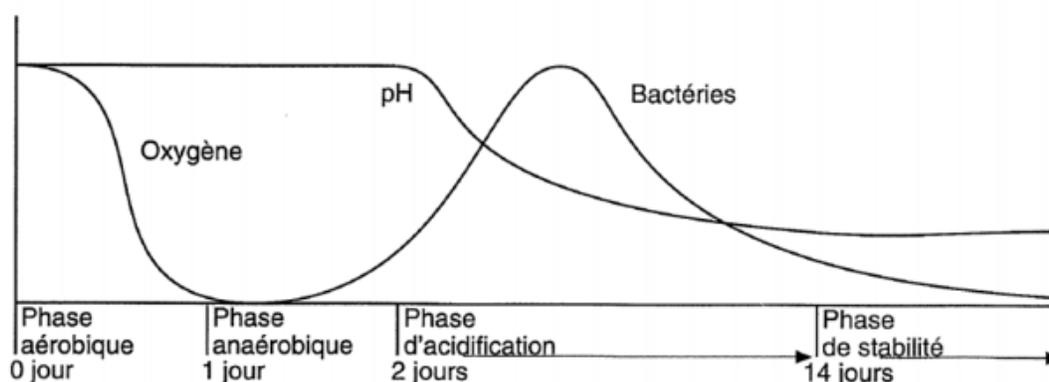


Figure 7 : Phases de fermentation de l'ensilage
(Source Bachant, 1998)

Il y est précisé que la teneur en acides de l'ensilage continue de croître durant les semaines suivantes en fonction de l'étanchéité du silo. L'acidité accrue tue la bactérie acidogène et inhibe la croissance des moisissures et des champignons qui pourraient diminuer la valeur nutritive de l'ensilage. Ce processus donne toujours lieu à la formation de gaz d'ensilage tels que le CO₂. Durant les six ou sept premiers jours qui suivent le remplissage du silo, le taux de production de gaz est le plus élevé. Pendant cette période, le volume des divers gaz produits représente plusieurs fois le volume du silo. Durant les trois à quatre semaines suivantes, la production de gaz diminue. Les gaz produits dans la masse végétale migrent en grande partie vers l'espace libre dans le silo. L'effet de tassement peut accélérer l'accumulation des gaz dans cet espace (voir Figure 8).

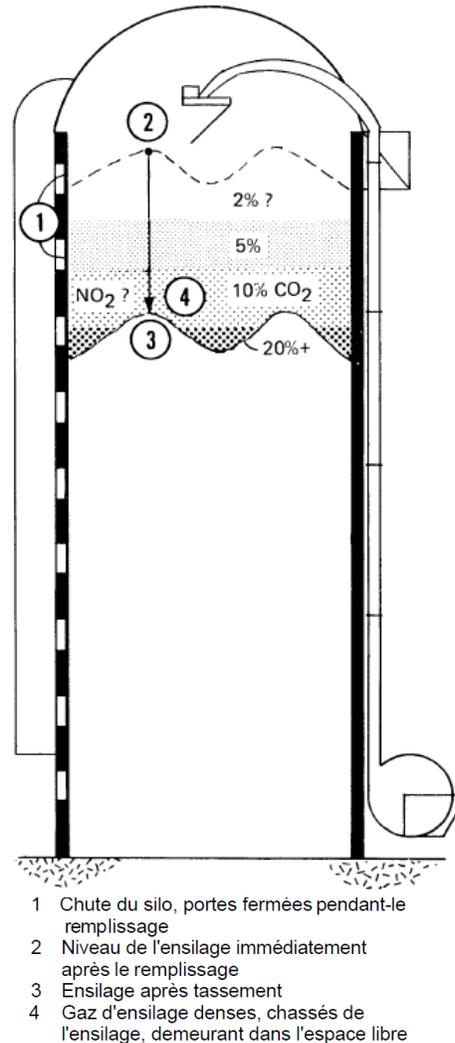


Figure 8 : Silo-tour typique à déchargement par le haut après le remplissage
(Source : Canada Service Plan M-7410 Gaz d'ensilage)

Les oxydes d'azote (NO_x) peuvent également être produits durant ce processus. Le stress causé aux plantes par certaines conditions météorologiques ou encore une surfertilisation en azote peut faire augmenter la teneur en nitrate (NO_3) des plantes avant la récolte et, donc, accroître le danger de production de ce groupe de gaz potentiellement mortels.

SECTION 4**4 ACCIDENT : FAITS ET ANALYSE****4.1 Chronologie de l'accident**

Monsieur [A] quitte sa résidence vers 5 h 30 le matin du 27 juillet 2019 pour aller travailler à la ferme [...] (Ferme Melga inc.). Entre 8 h 30 et 9 h, M. [A] démarre le souffleur à ensilage qui est relié au silo n° 2, sachant qu'il doit entrer prochainement dans celui-ci. Vers 9 h 30, M. [A] demande à M. [E], un travailleur, de venir l'assister afin de niveler l'ensilage à l'aide d'une fourche et d'étendre une toile et des boudins par-dessus l'ensilage. Une fois sur place, M. [A] demande à M. [E] d'attendre en bas du silo n° 2 avec un téléphone cellulaire afin qu'ils puissent demeurer en contact.

M. [A] attache deux fourches à une corde et il commence son ascension, sans harnais de sécurité, par l'échelle située dans la chute du silo (voir Figure 9). Lors de l'ascension, les fourches restent au sol tandis que M. [A] tient la corde avec lui. En cours d'ascension, M. [A] cogne sur les portes du silo afin de déterminer le niveau d'ensilage. À environ 21 mètres du sol, il s'immobilise et ouvre la sixième porte, à partir du haut du silo, qui mène à l'intérieur de celui-ci. M. [E] entend alors M. [A] prendre une ou deux grandes inspirations, puis il voit la corde tomber au sol, suivie du corps de M. [A].

M. [E] court alerter [...], M. [D], qui travaille dans l'étable. Celui-ci se rend aussitôt auprès de [A] et il communique immédiatement avec le 911. Il alerte ensuite [...], M. [C], qui travaille sur un tracteur. Les ambulanciers et les policiers arrivent sur les lieux et la victime est transportée à l'hôpital où son décès est confirmé.

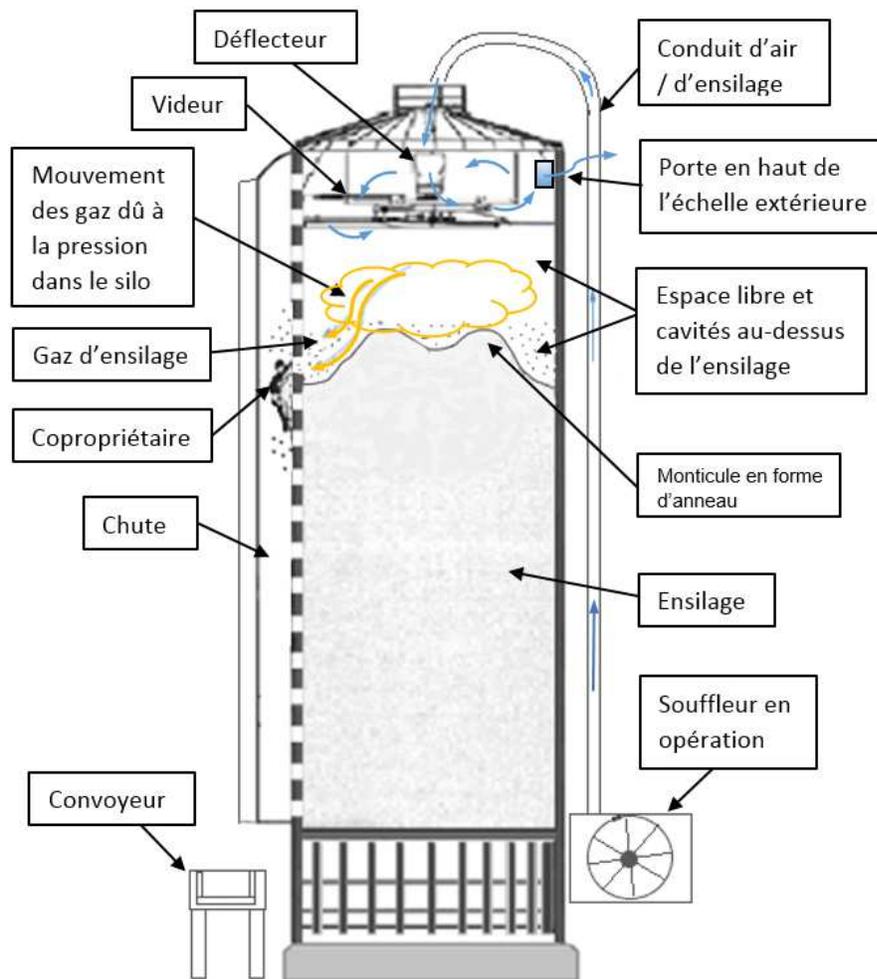


Figure 9 : Croquis du silo tour conventionnel en acier vitrifié n° 2 au moment de l'accident
(Source : CNESST)

4.2 Constatations et informations recueillies

Selon les témoignages recueillis, la récolte et l'ensilage de la luzerne ont débuté le 24 juillet en mi-journée pour se poursuivre le 25 juillet et se terminer le 26 juillet, vers 18 h 30. La dernière récolte du 26 juillet s'est effectuée dans un champ de première coupe à partir de semis du printemps.

Autres informations :

- Dans son témoignage, le travailleur présent au sol mentionne qu'il ne connaissait pas les dangers reliés au travail à l'intérieur des silos et qu'il ignorait la présence de gaz toxiques et les mesures à prendre pour se protéger.
- La porte ouverte par M. [A] dans la chute du silo, est la sixième à partir du haut, et se situe à une hauteur de 21 mètres.
- La surface de l'ensilage a une forme d'anneau d'une hauteur d'environ 1,5 m face à la paroi du silo et une cavité au centre.

- Lors de l'enquête, le débit d'air frais fourni par le souffleur a été évalué à partir de vitesses mesurées dans la canalisation. Le débit d'air est ainsi estimé à 4 994 m³/h pour le régime moteur du tracteur à 100 % et à 3 315 m³/h pour un régime moteur à 68 %.
- Selon un copropriétaire, lors de la ventilation avec le souffleur, le régime moteur est normalement ajusté à environ 80 %.
- La canalisation servant à souffler le fourrage dans le silo est composée d'une section circulaire dans la partie verticale qui monte le long du silo, et d'une section rectangulaire dans la partie horizontale arrondie sur le dessus du silo. La partie circulaire à un diamètre de 20,3 cm et la partie rectangulaire a des dimensions de 20,3 cm par 30,5 cm. La section horizontale de forme arrondie sur le dessus du toit, présente des dépôts de fourrage sur la surface interne inférieure.
- Les trois événements en forme d'écouille sur le toit du silo sont fermés et boulonnés.
- La porte d'accès en haut de l'échelle extérieure est ouverte.
- Selon les témoignages recueillis, le souffleur fonctionnait depuis 30 à 60 minutes avant l'accident.
- Aucun détecteur de gaz pouvant être présents dans le silo, n'est utilisé.
- Aucune procédure de travail dans un espace clos n'est élaborée ou mise en application par l'employeur

4.2.1 La réglementation applicable au travail dans un espace clos

Dans le cadre du travail à l'intérieur du silo n° 2, la section XXVI, Travail dans un espace clos du *Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST)* s'applique.

L'article 1 dudit règlement définit un espace clos comme suit :

« **espace clos** » : tout espace totalement ou partiellement fermé, notamment un réservoir, un silo, une cuve, une trémie, une chambre, une voûte, une fosse, y compris une fosse et une préfosse à lisier, un égout, un tuyau, une cheminée, un puits d'accès, une citerne de wagon ou de camion, qui possède les caractéristiques inhérentes suivantes :

1. Il n'est pas conçu pour être occupé par des personnes ni destiné à l'être, mais qui à l'occasion peut être occupé pour l'exécution d'un travail;
2. On ne peut y accéder ou on ne peut en ressortir que par une voie restreinte;
3. Il peut présenter des risques pour la santé, la sécurité ou l'intégrité physique pour quiconque y pénètre, en raison de l'un ou l'autre des facteurs suivants :
 - a. L'emplacement, la conception ou la construction de l'espace, exception faite de la voie prévue au paragraphe 2°;
 - b. L'atmosphère ou l'insuffisance de ventilation naturelle ou mécanique qui y règnent;
 - c. Les matières ou les substances qu'il contient;
 - d. Les autres dangers qui y sont afférents.

Au moment de l'accident, la majorité des caractéristiques mentionnées ci-dessus sont présentes à l'intérieur du silo tour conventionnel en acier vitrifié et dans sa chute.

L'article 297 définit une **personne qualifiée** pour effectuer des travaux dans un espace clos comme étant « une personne qui, en raison de ses connaissances, de sa formation ou de son expérience, est en mesure d'identifier, d'évaluer et de contrôler les dangers relatifs à un espace clos. »

L'article 298, **Travailleurs habilités**, stipule que « Seuls les travailleurs ayant les connaissances, la formation ou l'expérience requises pour effectuer un travail dans un espace clos sont habilités à y effectuer un travail. »

L'article 300, **Cueillette de renseignements préalable à l'exécution d'un travail**, mentionne les éléments devant être recueillis avant l'exécution d'un travail dans un espace clos :

Avant que ne soit entrepris un travail dans un espace clos, les renseignements suivants doivent être disponibles, par écrit, sur les lieux mêmes du travail :

- 1° ceux concernant les dangers spécifiques à l'espace clos et qui sont relatifs :
 - a) à l'atmosphère interne y prévalant, soit la concentration de l'oxygène, des gaz et des vapeurs inflammables, des poussières combustibles présentant un danger de feu ou d'explosion, ainsi que des catégories de contaminants généralement susceptibles d'être présents dans cet espace clos ou aux environs de celui-ci;
 - b) à l'insuffisance de ventilation naturelle ou mécanique;

[...]
- 2° les mesures de prévention à prendre pour protéger la santé et assurer la sécurité et l'intégrité physique des travailleurs, et plus particulièrement celles concernant :
 - a) les méthodes et les techniques sécuritaires pour accomplir le travail;
 - b) l'équipement de travail approprié et nécessaire pour accomplir le travail;
 - c) les moyens et les équipements de protection individuels ou collectifs que doit utiliser le travailleur à l'occasion de son travail;
 - d) les procédures et les équipements de sauvetage prévus en vertu de l'article 309.

Les renseignements visés au paragraphe 1° du premier alinéa doivent être recueillis par une personne qualifiée.

Les mesures de prévention visées au paragraphe 2 du premier alinéa doivent être établies par une personne qualifiée et mises en application.

L'article 301, **Information des travailleurs préalable à l'exécution d'un travail** énonce les informations à donner aux travailleurs préalablement à l'exécution d'un travail dans un espace clos :

Les renseignements visés aux paragraphes 1° et 2° du premier alinéa de l'article 300 doivent être communiqués et expliqués à tout travailleur, avant qu'il ne pénètre dans l'espace clos, par une personne qui est en mesure de l'informer adéquatement sur la façon d'y accomplir son travail de façon sécuritaire.

L'article 302, **Ventilation**, spécifie ce qui suit :

Sauf dans le cas où la sécurité des travailleurs est assurée conformément au paragraphe 3° de l'article 303, aucun travailleur ne peut pénétrer ou être présent dans un espace clos à moins que celui-ci ne soit ventilé par des moyens naturels ou par des moyens mécaniques de manière à ce qu'y soient maintenues les conditions atmosphériques suivantes :

- 1° la concentration d'oxygène doit être supérieure ou égale à 19,5% et inférieure ou égale à 23 %;
- 2° la concentration de gaz ou de vapeurs inflammables doit être inférieure ou égale à 10% de la limite inférieure d'explosion;
- 3° la concentration d'un ou plusieurs des contaminants visés au sous-paragraphe a du paragraphe 1° du premier alinéa de l'article 300 ne doit pas excéder les normes prévues à l'annexe I, pour ces contaminants.

S'il se révèle impossible, en ventilant l'espace clos, d'y maintenir une atmosphère interne conforme aux normes prévues aux paragraphes 1° et 3° du premier alinéa, un travailleur ne peut pénétrer ou être présent dans cet espace clos que s'il porte l'équipement de protection respiratoire prévu à l'article 45 et que si l'atmosphère interne de cet espace clos est conforme aux normes prévues au paragraphe 2° du premier alinéa.

L'article 306, **Méthode et fréquence des relevés** définit la méthode et la fréquence des relevés devant être effectués :

Des relevés de la concentration de l'oxygène dans l'espace clos ainsi que des gaz et des vapeurs inflammables et des contaminants mesurables par lecture directe et susceptibles d'être présents dans l'espace clos ou aux environs de celui-ci doivent être effectués :

- 1° avant que les travailleurs ne pénètrent dans l'espace clos et, par la suite, de façon continue ou périodique suivant l'évaluation du danger faite par une personne qualifiée;
- 2° si des circonstances viennent modifier l'atmosphère interne de l'espace clos et entraînent une évacuation des travailleurs en raison du fait que la qualité de l'air n'est plus conforme aux normes prévues aux paragraphes 1° à 3° du premier alinéa de l'article 302;
- 3° si les travailleurs quittent l'espace clos et le lieu de travail, même momentanément, à moins que ces relevés ne soient effectués de façon continue.

Les relevés doivent être effectués de manière à obtenir une précision équivalente à celle obtenue en suivant les méthodes décrites à l'article 44 ou, lorsque ces méthodes ne peuvent être appliquées, en suivant une autre méthode reconnue.

L'article 308, **Surveillance**, mentionne :

Lorsqu'un travailleur est présent dans un espace clos, une autre personne ayant pour fonction d'assurer la surveillance du travailleur et ayant les habiletés et les connaissances pour ce faire doit demeurer en contact visuel, auditif ou par tout autre moyen avec le travailleur, afin de déclencher, si nécessaire, les procédures de sauvetage rapidement.

La personne assurant la surveillance du travailleur doit être à l'extérieur de l'espace clos.

4.2.2 La norme canadienne CSA-Z1006-16 : Gestion du travail dans les espaces clos

La norme *CSA-Z1006-16 Gestion du travail dans les espaces clos* à l'article 3.1 définit un espace clos comme étant un :

Espace clos - lieu de travail :

- a) qui est entièrement ou partiellement fermé ;
- b) qui n'est pas conçu pour une occupation humaine permanente, ni destiné à cette fin; et
- c) dont les accès et les sorties sont restreintes ou de petites dimensions, ou qui présente une configuration interne qui compliquerait la prestation des premiers secours, l'évacuation, le sauvetage ou les autres interventions d'urgence.

À l'article A.2.2 de l'annexe A de ladite norme, nous retrouvons des exemples d'espaces qui ont le potentiel d'être qualifiés d'espaces clos. Au sein de la nomenclature, on y retrouve les silos.

La norme mentionne à la section 8.1.8 Analyses de l'air, que :

La personne compétente qui procède à l'appréciation des risques, doit déterminer la nécessité des éléments suivants et établir les exigences pertinentes :

- a) les analyses préalables à l'entrée;

[...]

- d) la surveillance continue;

[...]

Les analyses de l'air, le cas échéant, doivent être effectuées par une personne compétente et documentées. **Les espaces clos devraient être considérés comme dangereux jusqu'à preuve du contraire.**

4.2.3 La réglementation applicable à la protection contre les chutes

Dans le cadre des travaux en hauteur, la section III.1 du *Règlement sur la santé et la sécurité du travail* (RSST) [S-2.1, r. 13] sur la protection contre les chutes s'applique.

L'article 33.1 dudit règlement stipule ce qui suit :

33.1. Cas où le travailleur doit être protégé : Tout travailleur doit être protégé contre les chutes dans les cas suivants:

- 1° s'il est exposé à une chute de plus de 3 m à moins qu'il ne fasse qu'utiliser un moyen d'accès ou de sortie;
- 2° s'il risque de tomber:
 - a) dans un liquide ou une substance dangereuse;
 - b) sur une pièce en mouvement;
 - c) sur un équipement ou des matériaux présentant un danger;
 - d) d'une hauteur de 1,5 m ou plus dans un puits, un bassin, un bac, un réservoir, une cuve, un récipient qui sert à l'entreposage ou au mélange de matières, ou lorsqu'il manutentionne une charge.

L'article 23, 7° alinéas dudit règlement stipule ce qui suit :

23. Échelles fixes :

Les échelles fixes utilisées pour remplacer les escaliers de service doivent:

[...]

7° être pourvues d'un dispositif antichute conforme à la norme Dispositifs antichutes et cordes d'assurance verticales, CSA Z259.2.5, ou à la norme Dispositifs d'arrêt de chute et rails rigides verticaux, CSA Z259.2.4, s'il y a un danger de chute de plus de 6 m.

[...]

Malgré le paragraphe 7°, les échelles fixes installées avant le 3 janvier 2019 peuvent, jusqu'à ce qu'elles soient modifiées, être pourvues de crinolines, de cages ou d'un dispositif antichute conforme à la norme Fall Arresters, vertical Lifelines and Rails, CAN/CSAZ259.2.1-98, s'il y a un danger de chute de plus de 6 m.

4.2.4 Rapport d'expertise de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et sécurité du travail (CNESST)

Le mandat de cette expertise consiste à estimer la qualité de l'atmosphère qui aurait pu être présente dans le silo immédiatement avant l'accident et à expliquer la production de gaz d'ensilage, particulièrement dans les premières heures suivant la mise en silo de la luzerne, ainsi que l'effet des gaz d'ensilage sur la qualité de l'atmosphère à l'intérieur du silo.

Dans ce rapport d'expertise, il est précisé qu'à l'intérieur d'un espace clos, tel qu'un silo, une concentration en O₂ inférieure à 20,5 % indique une anomalie. Il est à noter que la concentration normale d'O₂ dans l'air est d'environ 21 %. Une concentration inférieure à 20,5 % peut être causée par une consommation d'O₂ ou une accumulation d'un autre gaz. Dans le cas d'un silo tour contenant de l'ensilage, les deux phénomènes peuvent se produire simultanément et provoquer une atmosphère fortement appauvrie en O₂. La figure 10 présente sommairement les principaux effets associés à une baisse des teneurs en O₂ dans l'air. Selon la littérature, une teneur en O₂ inférieure à 6 % provoque la mort en quelques minutes. Lorsque la teneur en O₂ est inférieure à 4 %, la perte de conscience survient après une ou deux inspirations.



Figure 10 : Effet d'une diminution des teneurs en O₂
(Source : INRS, France, cité dans le rapport d'expertise CNESST)

Dans le processus d'ensilage, l'auteur du rapport d'expertise mentionne que, durant la phase aérobie et dans des conditions optimales d'ensilage, presque tout l'O₂ contenu dans la masse végétale est consommé en une journée environ. Ensuite débute la phase anaérobie (voir section 3.2.1 Processus d'ensilage).

Selon l'expertise réalisée, en considérant la production la plus lente observée par Meiering *et al.* (1988), il est estimé qu'environ 230 kg de CO₂ pouvaient se retrouver au-dessus de la surface d'ensilage avant le démarrage de la ventilation avec le souffleur. Cette quantité correspond à un volume d'environ 130 m³ à une température de 20⁰ C et à une pression atmosphérique normale dans l'espace au-dessus de la surface de l'ensilage (voir Figure 11).

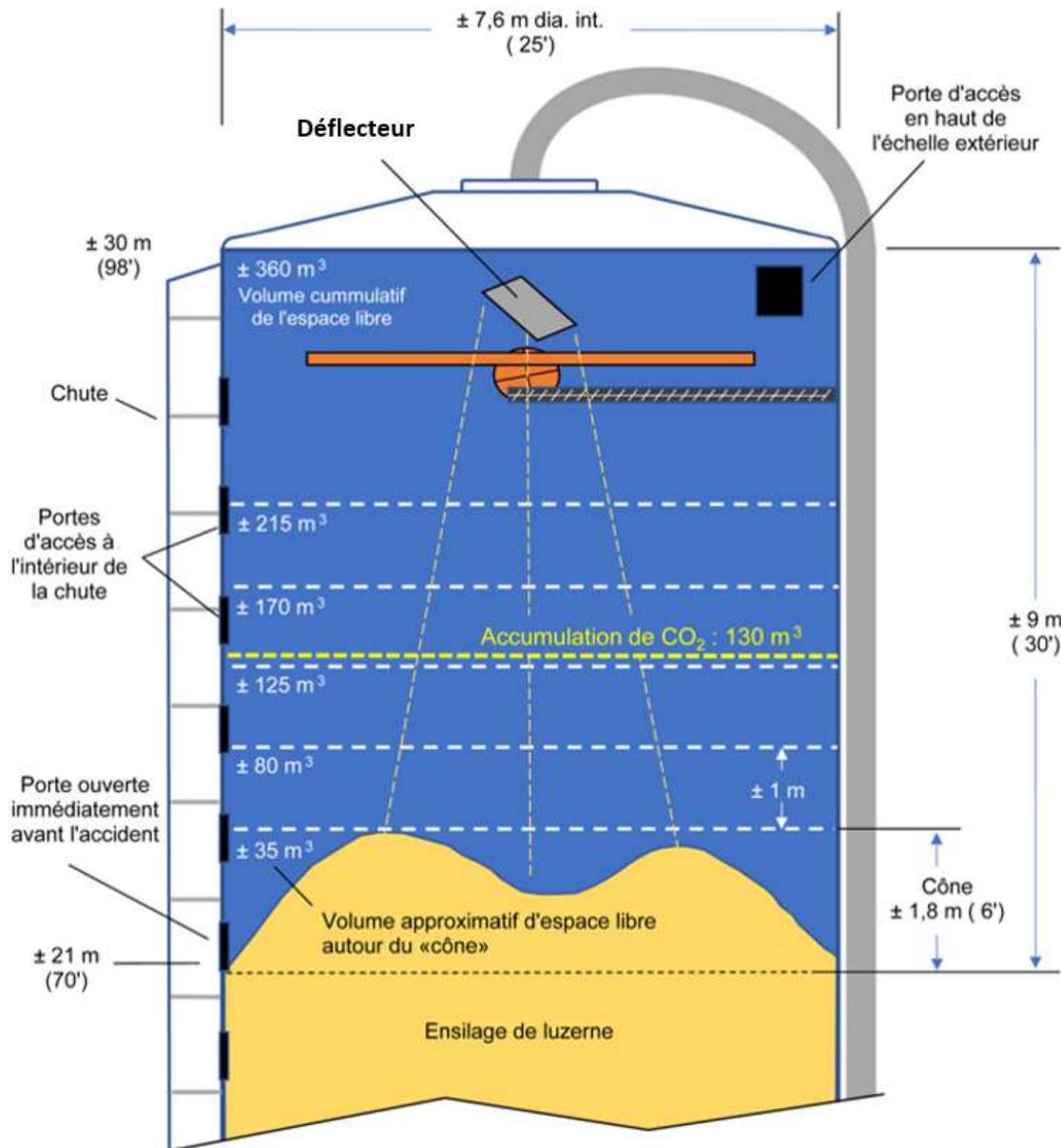


Figure 11 : Schéma du silo tour n° 2 montrant les volumes estimés de CO₂ avant l'accident

(Source : rapport d'expertise CNESST)

Il est à noter que le même exercice d'estimation du volume de CO₂ effectué par l'expert, réalisé en se basant sur le taux maximum de production observé par Meiering *et al.* (1988), donne un volume de CO₂ de près de 430 m³ qui occuperait tout l'espace libre dans le silo avant le démarrage de la ventilation.

Lorsque les portes de la chute sont fermées, le silo se comporte comme un récipient étanche. Les gaz lourds générés lors du processus de fermentation, notamment le CO₂ et le NO₂, s'accumuleront et seront initialement retenus dans la partie basse de l'espace libre, au-dessus de l'ensilage (voir Figure 11).

Selon l'expertise réalisée, les gaz lourds générés lors de la fermentation de l'ensilage sont présents dans les parties basses des silos tours dès les premières heures suivant la mise en silo. De plus, le processus de fermentation continue d'en générer bien au-delà des premiers jours.

Selon les vérifications et l'estimation réalisées par l'expert, immédiatement avant l'accident, l'atmosphère derrière la porte d'accès du silo qui a été ouverte pouvait être dépourvue d'O₂ et composée essentiellement de CO₂ et de NO_x augmentant la dangerosité de l'atmosphère. À ce moment, immédiatement derrière la porte qui a été ouverte, la concentration en oxygène pouvait être nulle. Dans ces conditions, une personne exposée à une telle atmosphère pouvait perdre conscience en quelques inspirations.

4.2.5 Rapport d'expertise firme BBA

Le mandat de cette expertise consiste à évaluer, de manière théorique, l'efficacité de la ventilation utilisée et à évaluer la pression d'air à l'intérieur du silo, dans les conditions qui prévalaient lors de l'accident.

4.2.5.1 Vitesse de l'air à la surface de l'ensilage sans déflecteur (sans obstacle)

Au sein du rapport d'expertise, il est expliqué que semblable à n'importe quel objet en mouvement dont la vitesse diminue avec la friction sur une certaine distance, la vitesse de l'air décroît à mesure que l'on s'éloigne de la source d'émission (point d'alimentation). On appelle « jet d'air » ce phénomène d'évolution de l'air qui, dans tout son développement, inclut de l'induction (introduction d'air ambiant) et une expansion d'environ 30°.

La vitesse du jet d'air à une distance X de la source peut être calculée. La figure 12 montre la réduction de la vitesse du jet d'air (en pourcentage) en fonction de la distance (X) à partir de la sortie du conduit d'entrée d'air de diamètre équivalent « D ».

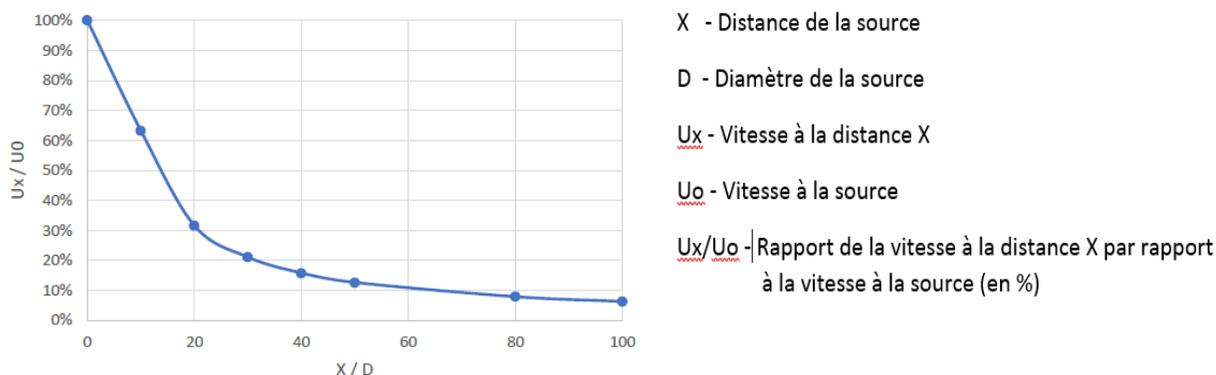


Figure 12 : Évolution du rapport U_x / U_0 en fonction de la distance X / D
(Source : Rapport d'expertise BBA)

Considérant la distance libre (X) de 10,58 m au-dessus de l'ensilage et un diamètre équivalent de l'entrée d'air (D) de 0,2438 m, le rapport X/D donne une valeur de 43,4. Les calculs réalisés estiment la vitesse de l'air (sans déflecteur ni autre obstacle) au-dessus de l'ensilage à 15 % de la vitesse d'entrée à la source. Avec un débit d'air frais à la source de 4000 m³/h (ce qui correspond à 80 % de la capacité maximale de l'arbre moteur), cela représente une vitesse de 2,7 m/s (toujours sans déflecteur ni autre obstacle).

4.2.5.2 Vitesse de l'air à la surface de l'ensilage avec déflecteur

Considérant la présence du déflecteur ayant une aire 13 fois plus grande que la section de la conduite d'arrivée d'air, et placé directement sous l'entrée d'air frais avec une inclinaison de 45°, la déviation du jet d'air frais vertical est estimée à 90° vers la paroi du silo. Cette obstruction crée une forte turbulence et fait en sorte que la résultante du jet d'air, vertical à l'origine, est essentiellement horizontale après sa déflexion.

De plus, la composante horizontale du jet d'air est en grande partie évacuée par la porte d'accès ouverte en haut de l'échelle extérieure.

À ce stade de l'étude, l'expertise estime le débit de la résultante verticale (vers la surface de l'ensilage) du jet d'air à 30 % de sa valeur d'origine. L'expertise évalue la vitesse de l'air au niveau de la surface de l'ensilage à 0,7 m/s.

Distance de la source (jet d'air)	Sans le déflecteur	Avec le déflecteur
0 m (sortie du conduit)	17,9 m/s	17,9 m/s
5 m	5,7 m/s	1,5 m/s
10.58 m (hauteur libre, situation de l'accident)	2,7 m/s	0,7 m/s

Tableau 1 : Composante verticale de la vitesse au centre du jet d'air en fonction de la distance de la source pour un **débit** d'air correspondant à 80 % de la puissance du souffleur.

Selon l'avis de l'expert, la vitesse de 0,7 m/s à la surface de l'ensilage représente une faible vitesse pour entraîner et forcer la dilution des gaz lourds accumulés à cet endroit.

4.2.5.3 Efficacité de la ventilation (dilution par soufflage)

Le rapport d'expertise mentionne que dans le domaine aéraulique, la dilution se fait par l'ajout constant d'air frais dans un espace donné, dans le but de diminuer la concentration d'un contaminant dans l'air ambiant. La dilution peut impliquer le déplacement d'un large volume d'air si les concentrations sont élevées ou si le volume de l'espace est important. Les mouvements d'air à l'intérieur d'un espace clos sont souvent complexes, car ils dépendent non seulement des débits, mais également des vitesses, des températures et de la masse volumique des contaminants présents.

Le rapport précise aussi que plus l'espace libre au-dessus de l'ensilage est important, plus il est difficile d'effectuer une dilution efficace puisque la formation de zones mortes est plus propice.

Lorsqu'il est question de dilution, il est nécessaire de considérer l'efficacité avec laquelle la quantité d'air présente contribue au mélange. Selon le livre de référence *Industriel Ventilation* de l'American Conference of Gouvernement Industriel Hygienists (ACGIH), l'efficacité de la dilution est définie par un facteur « K ». Ce dernier est établi principalement selon :

- la configuration de la ventilation (emplacement des entrées/sorties d'air);
- le balayage effectué dans l'espace ventilé (présence de zones mortes);
- l'exposition des travailleurs;
- la nature de la source de contamination;
- la toxicité des contaminants;
- la fiabilité des systèmes de ventilation en place (performance, entretien).

Dans des configurations différentes, la même quantité d'air n'effectue pas la même dilution. La valeur du « K » peut varier de 1 à 10. La valeur 1 représente la configuration la plus efficace, la valeur 10 représente une configuration ayant une très faible efficacité de dilution.

L'expertise établie la valeur « K » reliée aux circonstances de l'accident à 10, considérant les facteurs aggravants suivants :

- configuration de la ventilation : air poussé par le haut (plutôt que tiré);
- balayage effectué dans l'espace libre : proximité entre l'entrée et la sortie d'air, un seul point de ventilation (alimentation et évacuation), distance importante entre le fond de l'ensilage et l'alimentation (espace libre);
- nature de la source de contamination : génération de CO₂ et de NO_x en continu (fermentation) et gaz émis (CO₂ et NO_x) plus denses que l'air;
- toxicité des contaminants : atmosphère raréfiée en oxygène (gaz asphyxiants);
- fiabilité des systèmes de ventilation en place : système de ventilation propulsé par un moteur de tracteur dont le réglage est effectué manuellement (levier);
- zones mortes : la surface d'ensilage n'est pas horizontale.

À partir de la valeur « K » et du débit réel d'apport d'air frais à la source, le débit effectif efficace est déterminé par la formule suivante :

$Q' = Q/K$, où :

- Q' : débit de ventilation efficace ou effectif (m³/s ou p³/min (PCM))
- Q : débit de ventilation réel (m³/s ou PCM)
- K : facteur de dilution

4.2.5.4 Évaluation du temps de ventilation nécessaire

Considérant un débit d'air à la source de 1,11 m³/s (4000 m³/h ou 2352 PCM) et les concepts ci-haut mentionnés, le rapport d'expertise nous donne les évaluations suivantes sur le délai minimal requis pour effectuer un changement d'air effectif complet de l'espace libre au-dessus de l'ensilage dans les conditions qui prévalaient lors de l'accident :

- Sans déflecteur (aucun obstacle) : 63 minutes (environ 1 heure)
- Avec déflecteur (plaque déflectrice) : 208 minutes (environ 3,5 heures)

Le rapport d'expertise mentionne qu'étant donné que la majorité du débit d'air entrant est évacuée par la porte en haut de l'échelle extérieure, le débit d'air effectif est alors évalué à 0,33 m³/s, ce qui représente un faible débit pour entraîner et forcer la dilution des gaz lourds accumulés au niveau de la surface de l'ensilage.

4.2.5.5 Pressurisation du silo

L'expertise mentionne que lorsque la ventilation se fait par soufflage, une pression positive se crée dans l'enceinte et les contaminants sont susceptibles d'en sortir, provoquant ainsi la contamination des milieux environnants. L'ouverture d'une porte ou d'une trappe d'accès libère soudainement un espace suffisant pour que le chemin normalement emprunté par l'air pour sortir de l'enceinte soit modifié. La pression statique à l'extérieur étant plus faible, l'air contaminé sort par l'ouverture ainsi créée.

Considérant les éléments suivants :

- débit d'air frais de 1,11 m³/s;
- bouche de ventilation (entrée) de 20,3 cm par 30,5 cm;
- porte d'accès en haut de l'échelle extérieure ouverte (54 cm par 65,4 cm);
- porte d'accès utilisée par le travailleur dans la chute (54 cm par 65,4 cm).

Les experts de BBA évaluent que la pression positive à l'intérieur du silo était d'environ 20 Pa (de plus que la pression normale) avant l'ouverture de la porte depuis la chute.

Au moment de l'ouverture de la porte d'accès qui représente une aire relativement importante, il se crée un nouveau canal d'évacuation de l'air contenu dans le silo. En ouvrant la porte depuis la chute, le travailleur participe à la dépressurisation du silo. Étant donné que la porte d'accès est située au niveau de la surface d'ensilage, cette zone contenait principalement des gaz lourds tels que le CO₂ et le NO₂.

4.3 Énoncés et analyse des causes

4.3.1 L'arrivée de gaz asphyxiants dans la zone respiratoire du [A] provoque sa perte de conscience et engendre sa chute libre d'une hauteur d'environ 21 m.

Le début de l'ensilage de luzerne a débuté le 24 juillet vers midi pour se poursuivre le 25 juillet et se terminer le 26 juillet vers 18 h 30. Un délai d'environ 70 heures s'est écoulé entre la première mise en silo et l'accident, et un délai d'environ 15 heures entre la dernière mise en silo et l'accident. La littérature mentionne que les 12 à 60 heures suivant l'ensilage constituent la période ayant le plus haut taux de formation des gaz toxiques tel que le CO₂.

Durant ces premières heures, les plantes consomment l'O₂, laissant la place au CO₂. Étant donné que ce gaz commence à être produit dès les premières heures de la mise en silo et que celle-ci a débuté environ 70 heures avant l'accident, il est estimé que le volume de CO₂ généré avait rempli une grande partie de l'espace libre au-dessus de l'ensilage, bien au-dessus du niveau de la porte ouverte par M. [A]. Puisque la densité relative du CO₂ (1,53) est plus élevée que l'air (1), le CO₂ se tient principalement juste au-dessus de l'ensilage de luzerne, faisant en sorte que l'atmosphère derrière la porte ouverte était presque dépourvue d'O₂. Selon l'expertise réalisée, lorsque la teneur en O₂ est inférieure à 4 %, la perte de conscience survient après une ou deux inspirations.

Pour sa part, la seconde expertise nous démontre que, dans les conditions présentes lors de l'accident, la ventilation située juste derrière la porte ouverte par M. [A] était inefficace, et ce, même une heure après le démarrage du ventilateur. En effet, en tenant compte des éléments de ventilation tels que la distance libre au-dessus de l'ensilage, la présence du déflecteur directement dans le jet d'air, la disposition de l'entrée d'air et de la porte de sortie en haut sur le côté, ainsi que les zones mortes dues au non nivellement de l'ensilage, l'expertise évalue le temps nécessaire pour une ventilation efficace au niveau de la porte ouverte depuis la chute par le travailleur à 208 minutes (3,5 heures).

De plus, la pression positive à l'intérieur du silo causée par la ventilation par soufflage a pour effet de pousser les gaz asphyxiants dans la zone respiratoire de M. [A] lorsqu'il ouvre la porte menant à l'intérieur du silo.

La présence d'une telle atmosphère dans la zone respirable du [A] entraîne une perte de conscience rapide et, en l'absence de protection contre les chutes, il tombe d'une hauteur de 21 mètres et termine sa chute sur une structure métallique.

Cette cause est retenue.

4.3.2 **La procédure consistant uniquement à ventiler le silo à l'aide du souffleur à fourrage avant d'y entrer est insuffisante pour assurer la sécurité du travailleur.**

En raison de sa construction, le silo n° 2 de même que sa chute permettant d'y accéder sont des espaces clos au sens du RSST. Ainsi, la section XXVI, Travail dans un espace clos, dudit règlement doit s'appliquer.

On y retrouve notamment les notions de personne qualifiée en mesure d'identifier, d'évaluer et de contrôler les dangers relatifs à l'espace clos, et de travailleurs habilités ayant les connaissances, la formation ou l'expérience requises pour effectuer un travail dans un espace clos. Il y est aussi mentionné qu'une cueillette de renseignements tels que ceux concernant les dangers spécifiques, l'atmosphère interne dont l'oxygène et les contaminants susceptibles d'être présents, doit être effectuée par une personne qualifiée préalablement au début des travaux dans l'espace clos.

La réglementation mentionne aussi que l'espace clos doit être ventilé de manière qu'il y soit maintenu une concentration d'oxygène entre 19,5 % et 23 %, et une concentration des contaminants, tels que le CO₂ et le NO₂, inférieure aux normes établies (Annexe I du RSST). De plus, des relevés de la concentration de l'oxygène et des contaminants quantifiables par des mesures directes doivent être effectués avant que les travailleurs ne pénètrent dans l'espace clos et, par la suite, effectués de façon continue ou périodique suivant l'évaluation du danger réalisée par une personne qualifiée.

Le 27 juillet 2019, bien qu'ils aient mis en route le souffleur afin de ventiler l'intérieur du silo, [A] et le travailleur présent n'étaient pas informés adéquatement sur les risques reliés au travail à l'intérieur des silos. L'employeur ne leur avait pas assuré la formation, l'entraînement et la supervision appropriée afin que ceux-ci aient les connaissances et les habiletés requises pour accomplir de façon sécuritaire le travail en espace clos. Dans son témoignage, le travailleur présent au sol mentionne qu'il ne connaissait pas les dangers reliés au travail à l'intérieur des silos. Il ignorait la présence de gaz toxiques à l'intérieur et les mesures à prendre pour s'en protéger. Il n'a jamais été avisé par l'employeur d'un quelconque danger.

Donc, à l'exception du souffleur qui avait été mis en route afin de ventiler l'intérieur du silo, aucune procédure n'a été élaborée et appliquée pour y exécuter le travail de façon sécuritaire. Malgré le fait que M. [A] connaissait la présence possible de gaz toxiques, aucune vérification de l'efficacité de la ventilation n'est effectuée, telle que la mesure à l'aide d'un détecteur de gaz.

La seule présence de ventilation à l'aide du souffleur dans les conditions qui prévalaient au moment de l'accident n'a pas permis de contrôler et d'éliminer le danger lié au travail à effectuer dans le silo.

Cette cause est retenue.

SECTION 5

5 CONCLUSION

5.1 Causes de l'accident

Les causes suivantes sont retenues pour expliquer cet accident :

- L'arrivée de gaz asphyxiants dans la zone respiratoire du [A] provoque sa perte de conscience et engendre sa chute libre d'une hauteur d'environ 21 m.
- La procédure consistant uniquement à ventiler le silo à l'aide du souffleur à fourrage avant d'y entrer est insuffisante pour assurer la sécurité du travailleur.

5.2 Autres documents émis lors de l'enquête

À la suite de cet accident, une décision est rendue interdisant la poursuite des travaux en espaces clos jusqu'à ce qu'une procédure d'entrée en espace clos soit élaborée. Le rapport d'intervention RAP1273834 datant du 5 août 2019 fait état de l'intervention effectuée.

L'employeur a mandaté une firme spécialisée afin de poursuivre les travaux en espace clos nécessaires au bon fonctionnement de la ferme. L'employeur nous informe également qu'il n'a pas l'intention de poursuivre l'utilisation des silos tours conventionnels présents sur son établissement aux fins d'ensilage. Une fois l'ensemble des silos vides, l'employeur prévoit d'utiliser une méthode d'ensilage horizontal (silo couloir). Cette méthode d'ensilage permet que l'ensemble des manipulations de l'ensilage s'exécute à partir du sol, directement depuis l'extérieur.

5.3 Suivis de l'enquête

- La CNESST informera l'Union des producteurs agricoles (UPA), la fédération spécialisée Les producteurs de Lait du Québec et l'Association canadienne de sécurité agricole des conclusions de l'enquête afin qu'elles en informent leurs membres.
- La CNESST informera les fabricants et distributeurs de silos des conclusions de l'enquête.
- Dans le cadre du partenariat de la CNESST visant l'intégration de la santé et de la sécurité du travail dans la formation professionnelle et technique, le ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur diffusera, à des fins informatives et pédagogiques, le rapport d'enquête dans les établissements de formation qui offrent les programmes d'études en agriculture.

ANNEXE A**Accidenté**

Nom, prénom : [A]

Sexe : masculin

Âge : [...]

Fonction habituelle : [...]

Fonction lors de l'accident : Agriculteur, [...]

Expérience dans cette fonction : [...]

Ancienneté chez l'employeur : S/O

Syndicat : S/O

ANNEXE B**Liste des témoins et des autres personnes rencontrées**

1. Monsieur [D], [...];
2. Monsieur [C], [...];
3. Monsieur [B], [...];
4. Monsieur [E], [...], Ferme Melga inc.;
5. Madame Mary-Lou Baril, agent, Sûreté du Québec;
6. Madame Jalili Boucher, enquêteur, Sûreté du Québec;
7. Monsieur Richard Drapeau, coroner;
8. Monsieur [F], [...] Silo J.M. Lambert;
9. Monsieur [G], [...], Valmétal;
10. Monsieur [H], [...], Valmétal;
11. Monsieur [I], [...], Service Agricole Luke Bélanger;
12. Monsieur [J], [...], Service Agricole Luke Bélanger.

ANNEXE C

Rapport d'expertise CNESST



RAPPORT D'EXPERTISE

*Estimation de la qualité de l'atmosphère
à l'intérieur du silo en cause avant
l'accident et en absence de ventilation*

Rapport présenté à

*Sylvain Roy, inspecteur
Direction régionale de l'Estrie*

Préparé par

*François Granger, ing. et agr.
Conseiller expert à la Direction générale de la
prévention - inspection et du partenariat*

(seule la version originale est signée)

27 janvier 2020

Table des matières

1. Mise en contexte.....	3
2. Description du mandat.....	3
3. Informations reçues	3
4. Notions concernant les principaux gaz en lien avec l'ensilage.....	4
5. Production de gaz d'ensilage.....	5
6. Atmosphère probable dans le silo avant l'accident.....	8
7. Conclusion	10
Références.....	11

1. Mise en contexte

Sur une ferme laitière de Dixville en Estrie, le 27 juillet 2019, vers 9h30, une personne tombe d'un silo après avoir ouvert une porte d'accès située à 21 m au-dessus du sol.



Photo 1 : Silo tour en cause (photo CNESST)

2. Description du mandat

Le mandat consiste à estimer la qualité de l'atmosphère qui aurait pu être présente dans le silo immédiatement avant l'accident. Il consiste à expliquer la production de gaz d'ensilage, particulièrement dans les premières heures suivant la mise en silo ainsi que son effet probable sur la qualité de l'atmosphère à l'intérieur du silo en cause. Le mandat est réalisé à partir des informations recueillies par les inspecteurs de la CNESST ainsi que des données issues de la littérature.

3. Informations reçues

Selon les informations reçues, vers 9h30 le 27 juillet 2019, la victime est montée dans la chute du silo et a ouvert une porte d'accès située à 21 m de hauteur (70'), soit environ 70 heures après le début de la mise en silo de luzerne. Presque qu'immédiatement après avoir ouvert cette porte, la victime a vraisemblablement perdu conscience et a chuté au pied du silo.

Silo en cause :

Le silo en cause est un silo tour en acier vitrifié ouvert à l'atmosphère d'approximativement 100 pieds (30 m) de hauteur et de 25 pieds (7,6 m) de diamètre. Au moment de l'accident, le silo était rempli aux 2/3 d'ensilage de luzerne, soit, sur une hauteur d'environ 70 pieds (21 m). L'espace libre total au-dessus de l'ensilage correspondait à une hauteur d'environ 30 pieds (9 m). Le remplissage du silo a débuté vers 12h00 le 24 juillet et s'est terminé vers 18h30 le 26 juillet 2019. Ainsi, au moment de l'accident, le 27 juillet 2019 vers 9h30, environ 70 heures s'étaient écoulées depuis la mise en silo des premiers voyages d'ensilage.

Immédiatement avant l'accident, les portes d'accès à l'intérieur de la chute étaient fermées et le souffleur à ensilage fonctionnait depuis 30 à 60 minutes (ventilation mécanique). Selon les témoignages, seule la porte d'accès en haut de l'échelle extérieure était demeurée ouverte.

4. Notions concernant les principaux gaz en lien avec l'ensilage

La présence de gaz d'ensilage dans les silos à fourrage est bien documentée. Dans un tel silo, les gaz préoccupants sont, le dioxyde de carbone (CO₂) et les oxydes d'azote (NO_x), qui incluent l'oxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂), combinés ou non avec une déficience en oxygène (O₂).

Oxygène (O₂)

Au niveau de la mer, la concentration en oxygène dans l'air normal¹ est d'environ 21 %. En espace clos, tel qu'à l'intérieur d'un silo, une concentration inférieure à 20,5 % indique une anomalie (INRS, 2018).

Une concentration inférieure à 20,5 % peut être causée par une consommation d'oxygène ou une accumulation d'un autre gaz. Dans le cas d'un silo tour contenant de l'ensilage, les deux phénomènes peuvent se produire simultanément et résulter en une atmosphère fortement appauvrie en oxygène (section 5).

La figure 1, présente sommairement les principaux effets associés à une baisse des teneurs en O₂ dans l'air.

McManus (1999), rapporte qu'une teneur en O₂ inférieure à 6 % provoque la mort en quelques minutes. De plus, il mentionne que lorsque la teneur en O₂ est inférieure à 4 %, la perte de conscience survient après une ou deux inspirations.



Figure 1. Effets d'une diminution des teneurs en O₂ (INRS, 2018).

Dioxyde de carbone (CO₂)

Le CO₂ n'est pas un asphyxiant simple. Il peut avoir des effets physiologiques et toxiques selon sa concentration dans l'air (McManus, 1999) :

- > 50 000 ppm (5 %) : jugement altéré en quelques minutes; perte de conscience
- 40 000 - 50 000 ppm (4 à 5 %) : respiration 4 x plus rapide; signes de toxicité en 30 minutes
- 30 000 ppm (3 %) : respiration 2 x plus rapide; rythme cardiaque et pression sanguine augmentés

Par ailleurs, selon McManus (1999), le débit respiratoire est de l'ordre de 7 L/min lorsque la concentration de CO₂ dans l'air inspiré est normale (0,03 %)¹. À 1 % de CO₂, le débit respiratoire augmente à 8 L/min et à 2 % de CO₂, il passe à 9 L/min. Les effets néfastes du CO₂ peuvent être exacerbés par l'activité physique (Reptox, 2019).

À titre indicatif, il faut une augmentation de la concentration de CO₂ jusqu'à 7 % (70 000 ppm), pour atteindre la limite inférieure réglementaire de 19,5 % d'oxygène s'il s'agit du seul gaz ajouté à de l'air normal (Reptox, 2019).

Monoxyde d'azote (NO) et dioxyde d'azote (NO₂)

Le monoxyde d'azote (NO) est instable et à température ordinaire (20 °C – 25 °C), il se combine avec l'oxygène de l'air en formant du dioxyde d'azote (NO₂) (INRS, 2006; Reptox, 2019).

Le Reptox (2019) explique que « l'intoxication causée par l'inhalation de fortes concentrations de dioxyde d'azote (> 25 ppm) se produit en trois étapes :

- Une irritation plus ou moins intense des yeux, du nez et de la gorge causant des larmoiements, de la toux, des difficultés respiratoires (dyspnée) et des nausées. Ces symptômes disparaissent dès la fin de l'exposition.

¹ Au niveau de la mer l'air sec contient : 20,9 % O₂ | 78 % N₂ | 0,9 % Ar | 0,03 % CO₂ | 0,17 % gaz traces (Dräger).

- Une période de rémission plus ou moins asymptomatique pouvant durer de 6 à 24 heures.
- Le développement d'un œdème pulmonaire associé à une détresse respiratoire (tachypnée, cyanose et bronchospasme) et pouvant être déclenché par un effort physique léger. »

Aussi, l'exposition au dioxyde d'azote (NO₂) peut avoir un effet à retardement avec des conséquences graves, voire mortelles. Malgré l'absence apparente de symptômes, il est très important que les personnes exposées se rendent à l'urgence et informent le médecin qu'elles ont été exposées à des gaz d'ensilage.

Le tableau 1, présente les principales propriétés et les seuils d'exposition pour le CO₂, le NO et le NO₂.

Tableau 1. Propriétés et seuils d'exposition pour les principaux gaz d'ensilage (REPTOX, 2019; INRS, 2006)

Gaz		Masse molaire g/mol	Solubilité dans l'eau g/l à 20 °C	Densité relative de vapeur (air = 1)	État à 20 °C	Seuil olfactif ppm	DIVS ppm	VEMP (8 heures) ppm	VECD (15 min.) ppm
Formule	Nom								
CO ₂	Dioxyde de carbone	44,01	1,64	1,53	gaz	s.o.	40 000	5 000	30 000
NO	Monoxyde d'azote	30,01	47	1,04	gaz	0,3 à 1	100	25	-
NO ₂	Dioxyde d'azote	46,01	forme un acide	1,59	liquide*	0,1 à 5	20	3	-

* À 20 °C, le dioxyde d'azote est un liquide très volatil jaune brun. À partir de 21 °C (son point d'ébullition), il existe sous forme de gaz rouge brun, d'odeur très irritante (Reptox, 2019).

5. Production de gaz d'ensilage

L'ensilage des plantes fourragères est d'abord un processus de fermentation biologique. Ainsi, plusieurs facteurs peuvent influencer la production de gaz ainsi que la vitesse et la durée de ce processus, telles les populations de microbes, notamment de bactéries et de levures, l'humidité, la température ambiante, la teneur en sucres et autres nutriments, le type de plante, la granulométrie de la masse de plantes hachées, la densité du matériel, l'évolution des gaz et du pH dans la masse, etc. (Lafrenière, 2008; Jones et al. 2004; Bachand, 1996; Meiring et al., 1988).

Les principales phases du processus d'ensilage sont présentées à la figure 2. La phase aérobie, débute à la fauche et se termine lorsqu'il n'y a plus d'oxygène ou de sucres facilement disponibles dans la masse de matériel végétal (Lafrenière, 2008; Jones et al. 2004). La phase aérobie est caractérisée par la respiration des plantes et la dégradation des protéines. La respiration utilise l'oxygène de l'air présent à l'intérieur de la masse pour transformer les sucres en dioxyde de carbone (CO₂), en eau et en chaleur (Lafrenière, 2008). Dans des conditions optimales d'ensilage, presque tout l'oxygène dans la masse est consommé en 1 journée environ (Jones et al. 2004; Bachand, 1996).

Durant les phases anaérobies, la production de CO₂ se poursuit jusqu'à la fin de l'acidification de la masse après une période d'environ 21 jours (stabilisation), notamment par la transformation des hydrates de carbone lors de la fermentation lactique (Jones et al. 2004).

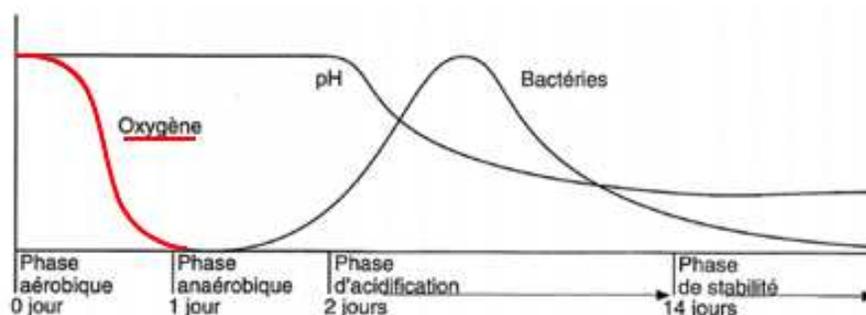


Figure 2 : Phases de fermentation de l'ensilage – *adaptation CNESST* (Pitt, 1990, cité par Bachand, 1996)

Parallèlement à la production de CO₂, il peut aussi y avoir production d'oxydes d'azote (NO_x) dans la masse végétale ensilée, et ce, dès les premières heures du processus (Bahloul et al., 2011; Reid et al., 1984). La figure 3 illustre l'évolution des gaz dans la masse d'ensilage durant les premières heures.

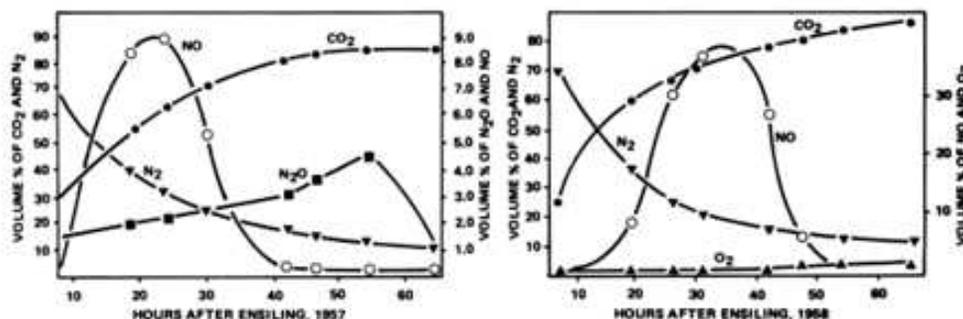


Figure 3 : Évolution des gaz dans la masse d'ensilage
(Étude de Wang et Buris, 1960, citée par Reid et al., 1984)

Dans une étude portant sur la cinétique de fermentation et sur la production de gaz toxiques lors de l'ensilage, Meiering et al. (1988) ont mesuré et ont modélisé les taux de production de CO₂ et de NO_x pour l'ensilage de raygrass.

Les taux maximums de production qu'ils ont obtenus, tels que rapportés par Jiang et al. (1990), sont de :

- 0,098 g CO₂ • h⁻¹ • kg_{sec}⁻¹ d'ensilage (1er jour de l'essai 1), et de;
- 0,9 mg NO_x • h⁻¹ • kg_{sec}⁻¹ d'ensilage (3e jour de l'essai 2).

Par ailleurs, l'étude de Meiering et al. (1988) démontre que la production de gaz est plus rapide dans les premiers jours lorsque l'ensilage est plus humide. Le tableau 2 présente la production cumulative de CO₂ pour leurs essais où seule la teneur initiale en matière sèche du raygrass diffère. Pour une production totale similaire, une plus grande quantité de CO₂ est produite initialement avec l'ensilage plus humide (21 % de matière sèche).

Tableau 2. Production cumulative de CO₂ en g•kg_{sec}⁻¹ d'ensilage pour le raygrass selon les résultats de Meiering et al. (1988)

Après :	1 jour	2 jours	3 jours	21 jours
21 % de matière sèche (essai 1 : sans préfanage)	2,6 (40 %)	4 (60 %)	4,8 (73 %)	6,6 (100 %)
40 % de matière sèche (essai 3 : avec préfanage)	0,8 (13 %)	1,1 (18 %)	1,8 (30 %)	6 (100 %)

La teneur en nitrate des plantes quant à elle affecte la production de NO_x. Cela est également démontré par l'étude de Meiering et al. (1988) qui ont obtenu une production de NO_x plus importante pour les essais avec une fertilisation azotée de 120 kg N/ ha appliquée à la culture une semaine avant la récolte (maximum cumulatif après 21 jours de 45 à 160 mg NO_x • kg_{sec}⁻¹ d'ensilage contre 1 à 60 mg NO_x • kg_{sec}⁻¹ d'ensilage sans cette fertilisation azotée).

Par ailleurs, les études de Meiering et al. (1988) et de Jiang et al. (1990) montrent également que la production de CO₂ et de NO_x se poursuit au-delà des premières journées suivant la mise en silo.

Lors d'études portant sur les conditions internes et la ventilation dans des silos tours en exploitation, d'autres auteurs ont mesuré les concentrations en gaz dans l'espace vide au-dessus de l'ensilage (Bahloul et al., 2011 [3 silos]; Kedan et al., 2007 [2 silos]; Groves et Ellwood, 1989 [5 silos]; Sabourin, 1983 [39 silos]). Ces études montrent une grande variabilité des concentrations de gaz pour des situations en apparence semblables, notamment dans le cas des silos ouverts à l'atmosphère. Il ressort également de ces études que la production de gaz peut être très intense dans les premiers jours suivant la mise en silo et qu'elle peut se poursuivre au-delà de ceux-ci, tel qu'attendu pour le processus de fermentation des ensilages (Jones et al., 2004). Plusieurs auteurs émettent un avertissement concernant les conditions atmosphériques imprévisibles dans les silos tours.

Sabourin (1983) a montré que dans certains cas, soit moins de 20 heures près la mise en silo d'ensilage de maïs ou de foin, la production de CO₂ était telle que sa concentration remontait à plus de 2% près de la surface d'ensilage (0,3 m) lorsque la ventilation était arrêtée. La hauteur libre dans ces silos variait de 9 à 13 m.

Kedan et al. (2007) ont mesuré la concentration en gaz dans l'espace libre au-dessus de l'ensilage pour deux silos hermétiques. Leurs résultats montrent que 4 et 6 jours après le remplissage, la concentration en oxygène est très basse dans tout le profil malgré une hauteur libre de 12 à 20 pieds au-dessus de l'ensilage, soit moins de 6,5 % O₂ dans le cas du premier silo et moins de 3 % O₂ dans le cas du second silo.

Dans un silo d'acier non hermétique, 13 h après un 2^e remplissage et pour une hauteur libre variant de 2,4 m (8 pieds) à 4,7 m (16 pieds), Groves et Ellwood (1989), ont mesuré à 1,5 m au-dessus de la surface de l'ensilage, une teneur en O₂ de 12 % et moins dans les parties basses. Ainsi, en l'absence d'échange avec l'atmosphère, la teneur en oxygène de l'air initialement présent dans l'espace libre diminue rapidement.

Enfin, les gaz lourds produits peuvent s'écouler par gravité par la chute et atteindre les locaux situés au pied du silo. Le phénomène est reconnu et le Code national de construction des bâtiments agricoles (CNCBA, 1995) exige une ventilation mécanique continue par extraction basse dans ces locaux. L'écoulement des gaz au bas du silo a d'ailleurs été observé par Bahloul et al. (2011).

6. Atmosphère probable dans le silo avant l'accident

Le silo en cause était à l'origine un silo hermétique en acier vitrifié qui a été modifié en silo conventionnel. Selon les informations obtenues par les inspecteurs le silo en cause est muni d'une chute et il y a 18 portes d'accès faisant chacune 54 cm de large x 65 cm de haut (21 ¼" x 25 ¾"). La toiture fait environ 1,4 m (55") de haut et il n'y a aucun évent de toit. En haut de l'échelle extérieure, il y a une porte d'accès ayant les mêmes dimensions que les portes dans la chute. Un videur est installé à l'intérieur du silo et le remplissage du silo se fait par le haut. Lors du remplissage l'ensilage est distribué dans le silo par une plaque tournante montée sur le videur.

Les conditions connues avant l'accident sont les suivantes :

- Près de 70 heures s'étaient écoulées depuis le début de la mise en silo de l'ensilage;
- Le silo était rempli au 2/3 :
 - Environ 21 m d'ensilage et 9 m de hauteur libre.
- Le souffleur à fourrage fonctionnait à vide depuis 30 à 60 minutes (ventilation mécanique);
- Toutes les portes d'accès dans la chute étaient fermées;
- La toiture est dépourvue d'évents ouverts;
- La porte d'accès au niveau de la passerelle en haut de l'échelle extérieure était ouverte;
- La plaque de distribution de l'ensilage était en place et immobile;

Enfin, la porte qui a été ouverte immédiatement avant l'accident était localisée à la base du cône formé lors du remplissage du silo.

Ventilation mécanique de l'espace libre

Les grandes hauteurs libres sont difficiles à ventiler. Par exemple, pour ventiler mécaniquement un silo à l'aide du souffleur à fourrage lorsque la hauteur libre est grande, CSP (1988) recommande d'ajouter un conduit pour que l'arrivée d'air soit à moins de 6 m de la surface de l'ensilage.

Le silo, notamment dans sa partie basse, se comporte comme un récipient étanche où les gaz lourds seront retenus. En absence d'une ventilation efficace, les gaz lourds générés lors du processus de fermentation, notamment le CO₂ et les NO_x, sortiront progressivement de la masse de végétaux dans l'espace libre où ils s'accumuleront à commencer par la partie basse.

Par ailleurs, dans le silo en cause, la plaque de distribution de l'ensilage pouvait faire obstacle au jet d'air du souffleur à fourrage et nuire à l'efficacité de la ventilation réalisée avec cet équipement.

L'évaluation de l'efficacité de la ventilation dans le silo en cause à l'aide du souffleur à fourrage avant l'accident fait l'objet d'une autre expertise qui a été réalisée par la firme BBA.

L'estimation qui suit consiste uniquement en une évaluation de l'accumulation de gaz dans le silo avant l'accident en supposant qu'il n'y a pas de ventilation mécanique.

Estimation des volumes de gaz dans l'espace libre du silo

L'estimation des quantités de gaz produites lors de la fermentation est basée sur la quantité de matière végétale ensilée.

Avant l'accident, le silo était rempli au 2/3, soit jusqu'à une hauteur de 21 m (excluant le cône formé lors du remplissage), ce qui correspond à un volume d'environ 950 m³ d'ensilage. À partir des données de capacité des silos d'acier du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO, 2012) et des masses volumiques moyennes présentées dans le CNCBA (1995), il est estimé que ce volume correspond à une quantité d'environ 775 t b.h.² à 60 % d'humidité (densité de 815 kg/m³ après tassement) et correspondant à environ 310 t b.s. d'ensilage.

En effet, dans le cas des silos tours ouverts à l'atmosphère, il est recommandé d'ensiler la luzerne à un taux de matière sèche (m.s.) de l'ordre de 35 à 40 % (Lafrenière, 2008; Jones et al., 2004). Un taux de 40% m.s. a été retenu compte tenu qu'on recommande également d'avoir un matériel un peu plus sec dans le bas du silo pour éviter les écoulements.

Pour l'estimation du volume de CO₂ qui aurait migré dans l'espace libre au-dessus de l'ensilage, les hypothèses suivantes sont considérées :

- Le silo a été rempli en 3 jours, à raison d'environ 100 t b.s./j pour un total de 300 t b.s.;
- L'accident est survenu environ 70 h après le début de la mise en silo du premier lot de 100 t b.s.;
- Chaque lot de 100 t b.s. produit du gaz dès le début de sa mise en silo;
- Durant les premières 24 heures tout l'oxygène dans la masse d'ensilage d'un lot est consommé et le CO₂ demeure dans la masse;
- Pour chaque lot de 100 t b.s., il n'y pas de contribution au volume de CO₂ dans l'espace libre durant les premières 24 heures suivant le début de la mise en silo;
- Le volume de CO₂ s'accumulant dans l'espace libre correspond à la contribution cumulative de chaque lot en fonction des durées de contribution suivantes :
 - Durées de contribution dans l'espace libre : ± 50 h (lot 1), ± 25 h (lot 2) et ± 1,5 h (lot 3).

En utilisant les durées de contribution ci-haut et un taux de production de gaz de 0,03 g CO₂ • h⁻¹ • kg_{sec}⁻¹ qui correspond à la production plus lente observée par Meiring et al. (1988) dans le cas d'un ensilage de raygrass à 40 % m.s. (tableau 2), il est estimé qu'environ 230 kg CO₂ pouvaient se retrouver au-dessus de la surface d'ensilage avant l'accident. Cette quantité correspond à un volume d'environ 130 m³ à 20 °C et 1 atm dans l'espace libre au-dessus de la surface d'ensilage.

La figure 4 montre un schéma du silo en cause indiquant le volume cumulatif de l'espace libre (± 45 m³ par mètre de hauteur) ainsi que le niveau qui pouvait être atteint par le CO₂ avant l'accident, en absence de ventilation. Le niveau de CO₂ estimé se situe au-dessus du niveau de la porte d'accès qui a été ouverte au moment de l'accident. À ce moment, immédiatement derrière la porte qui a été ouverte, la concentration en oxygène pouvait être nulle.

Il est à noter que le même exercice d'estimation du volume de CO₂, réalisé en se basant sur le taux maximum de production observé par Meiring et al. (1988), résulte en un volume de CO₂ de près de 430 m³ qui occuperait tout l'espace libre dans le silo.

² bh : base humide, bs : base sèche

La production de NO_x, notamment celle de NO₂ qui est un gaz lourd, n'est pas estimée. Étant un peu plus lourd que le CO₂, si du NO₂ était présent, il se retrouvait à la base du cône, immédiatement derrière la porte qui a été ouverte.

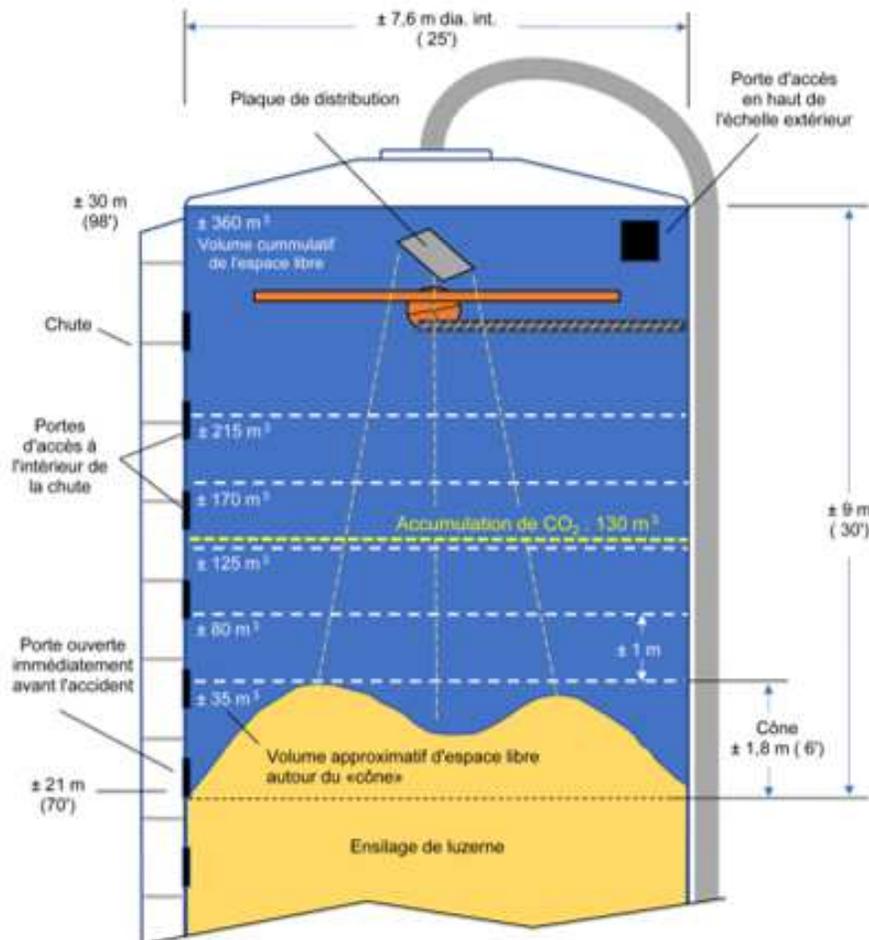


Figure 4. Schéma du silo en cause représentant le volume de CO₂ qui pouvait être atteint avant l'accident.

7. Conclusion

La littérature démontre que les gaz lourds générés lors de la fermentation de l'ensilage sont présents dans les parties basses des silos tours dès les premières heures suivant la mise en silo. De plus, ils sont générés par le processus de fermentation bien au-delà des premiers jours.

En absence de ventilation, les données de la littérature et l'estimation réalisée démontrent qu'immédiatement avant l'accident, l'atmosphère se situant derrière la porte d'accès qui a été ouverte, pouvait être dépourvue d'oxygène. Une personne exposée à une telle atmosphère pouvait perdre conscience en quelques inspirations.

L'atmosphère derrière la porte pouvait être constituée essentiellement de CO₂ et de NO_x, augmentant la dangerosité de l'atmosphère.

Références

Bahloul, A., B. Roberge, N. Goyer, M. Chavez, et M. Reggio, 2011. *La prévention des intoxications dans les silos à fourrage (version révisée)*. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. RAPPORT R-672.

CNCBA, 1995. *Code national de construction des bâtiments agricoles - Canada 1995*. Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies. Conseil national de recherches scientifique Canada. CNRC 38732F.

CSP, 1988. Danger Gaz d'ensilage. Canada Service Plan / Service de plans canadiens. PLAN M-7410 RÉVISION : 88.09

Groves, J.A. and P.A. Ellwood, 1989. *Gases in forage tower silos*. Occupational Medicine and Hygiene Laboratories, Health and Safety Executive, London, UK. Ann. Occ. Hyg. Vol 33 No 4; 519-535.

INRS, 2018. *Dossier espaces confinés*. Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS), France.

INRS, 2006. *Oxydes d'azote Fiche toxicologique n°133*. Base de données FICHES TOXICOLOGIQUES. Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS), France. Édition 2006.

Jackson, H.A. and J.R. Lessard, 1977. *Effects of moisture content on corn silage density and storage losses in a large tower silo*. Can. Agric. Eng. 19:57-58.

Jiang, S., E.M. Barber, A.G. Meiering and J.C. Jofriet, 1990. *Toxic gas production and silo ventilation*. Can. Agric. Eng. 33: 151-159

Jones, C. M., A. J. Heinrichs, G. W. Roth and V. A. Ishler, 2004. *From Harvest to Feed: Understanding Silage Management*. Pennsylvania State University. Penn State College of Agricultural Sciences Cooperative Extension.

Kedan, G., P. Spielholz, T. Sjostrom, B. Trenary and R.E. Clark, 2007. *An assesment of gases in oxygen deficient hay silos and the effect of forced ventilation*. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). Journal of Agricultural Safety and Health vol. 13(1): 83-95.

Lafrenière, C., 2008. *L'ensilage*. Guide sur les bovins laitiers. Centre de référence en agriculture et en agroalimentaire du Québec (CRAAQ).

McManus, N., 1999. *Safety and health in confined spaces*. NorthWest Occupational Health and Safety, North Vancouver BC, Canada. Lewis publishers.

Meiering, A.G., M.G. Courtin, S.F. Spoelstra, G. Pahlow, H. Honig, R.E. Subden, E. Zimmer, 1988. *Fermentation Kinetics and toxic Gas Production of Silages*. Transactions of the ASAE, Vol. 31(2): March-April 1988.

MAAARO, 2012. Capacité des silos-tours. Fiche Technique 96-142. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario. Édition révisée de 2012.

Reid, W.S., J.E. Turnbull, H.M. Sabourin and M. Ihnat, 1984. *Silo gas: Production and detection*. Can. Agric. Eng. 26: 197-207.

Reptox, 2019. Répertoire toxicologique. Commission des normes, de l'équité de la santé et de la sécurité du travail.

Sabourin, H.M., 1983. *Production, détection et évacuation des gaz toxiques (CO₂ et NO_x) dans les silos verticaux*. Roche Groupe conseil et Institut de recherche technique et de statistique, dossier no. 35SZ.01843.0.ME09, Agriculture Canada, 119 pages.

ANNEXE D
Rapport d'expertise BBA





CNESST

CNESST
Ventilation sécuritaire des silos agricoles
Sherbrooke, QC

Rapport technique
**Expertise sur la ventilation du silo de la ferme
Meiga**

N° document BBA / Rév. : 5552015-001000-45-ERA-0001 / R01
31 janvier 2020

FINAL



Préparé par :
Joël Lapointe, ing.
OIQ n° 5077257

Préparé par :
Alexia Grenier, ing., Ph.D.
OIQ n° 140207

Vérfié par :
Hugues Châteauneuf, ing.
OIQ n° 121721



Ventilation sécuritaire des silos agricoles

Rapport technique
Expertise de la ventilation du silo de la ferme
Melga

CNESST

HISTORIQUE DES RÉVISIONS

Révision	État du document – Description de la révision	Date
R00	Final	2020-01-17
R01	Final	2020-01-31

Ce document est préparé par BBA pour le seul bénéfice de son Client et ne peut être utilisé par aucune autre partie et pour aucune autre fin sans le consentement préalable écrit de BBA. BBA ne sera en aucun cas responsable des dommages, pertes, réclamations ou frais quels qu'ils soient découlant ou en relation avec l'utilisation de ce document par toute autre personne que le Client.

Bien que les informations contenues dans ce document soient fiables sous réserve des conditions et limitations qui y sont prévues, ce document est fondé sur des informations qui ne sont pas sous le contrôle de BBA ou que BBA n'a pu vérifier; par conséquent, BBA ne peut en garantir la suffisance et l'exactitude. Les commentaires contenus dans ce document reflètent l'opinion de BBA à la lumière des informations disponibles au moment de la préparation du document.

L'utilisation de ce document confirme l'acceptation de ces conditions.



TABLE DES MATIÈRES

1. Mise en situation	1
1.1 Compréhension des besoins	1
1.2 Objectifs du mandat	1
2. Méthodologie.....	2
3. Configuration de la ventilation du silo lors de l'accident mortel	2
3.1 Description.....	2
3.2 Processus d'ensilage et formation des gaz d'ensilage	5
4. Simulation aéraulique et efficacité de la ventilation.....	6
4.1 Vitesse du jet d'air à la surface d'ensilage	6
4.2 Efficacité de ventilation (dilution par soufflage)	8
4.3 Pressurisation du silo	16
5. Conclusions.....	18
6. Recommandations.....	18
6.1 Suite de l'étude	18
6.2 Pistes de solutions	19

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1 : Densité relative des gaz d'ensilage (CO ₂ , NO, NO ₂).....	5
Tableau 2 : Vitesse au centre du jet d'air en fonction de la distance de la source (sans plaque déflectrice)7	
Tableau 3 : Composante verticale de la vitesse au centre du jet d'air en fonction de la distance de la source (avec et sans plaque déflectrice) pour un débit d'air correspondant à 80 % de la puissance.....	8
Tableau 4 : Détermination du facteur de dilution (K) – Cas de la ferme Melga	11
Tableau 5 : Avantages et inconvénients de la ventilation par soufflage et aspiration dans le cas d'un silo ventilé	20
Tableau 6 : Documents de référence (Codes, normes et règlements).....	22



Ventilation sécuritaire des silos agricoles

Rapport technique

Expertise de la ventilation du silo de la ferme
Melga

CNESST

LISTE DE FIGURES

Figure 1 : Schéma des conditions prévalant dans le silo au moment de l'accident	4
Figure 2 : Évolution du rapport U_x / U_0 en fonction de la distance X / D	6
Figure 3 : Représentation schématique de l'évolution de la vitesse du jet d'air en fonction de la distance X	7
Figure 4 : Mélange de courants d'air (source : Baturin, 1972)	9
Figure 5 : Valeurs suggérées pour le facteur de dilution (K) selon différentes configurations.....	10
Figure 6 : Représentation des mouvements d'air dans le silo en l'absence de plaque déflectrice.....	13
Figure 7 : Représentation des mouvements d'air dans le silo avec la plaque déflectrice (situation de la ferme Melga).....	15
Figure 8 : Représentation des mouvements d'air dans le silo avec la plaque déflectrice (situation de la ferme Melga) juste après l'ouverture de la porte dans la chute.....	17
Figure 9 : Variation de la concentration de polluant en fonction de la position des entrées / sorties d'air dans le cas d'oxycoupage/ soudage «au sol»	20



Ventilation sécuritaire des silos agricoles

Rapport technique
Expertise de la ventilation du silo de la ferme
Melga

CNESST

1. MISE EN SITUATION

1.1 Compréhension des besoins

Dans le but de soutenir les conclusions du rapport d'enquête qui sera rédigé par la CNESST, une étude spécifique portant sur la ventilation en présence lors de l'accident mortel survenu à la ferme Melga est requise.

Différents gaz sont produits durant la fermentation de la luzerne dont le dioxyde de carbone (CO₂) et des oxydes d'azote (NO_x), ce qui impose une évacuation efficace de ces gaz avant toute entrée dans l'espace clos que représente le silo et sa chute.

Le mandat d'expertise confié à BBA consiste à évaluer de manière théorique l'efficacité de la ventilation utilisée couramment dans le milieu agricole lors de l'intervention à l'intérieur des silos, et tout particulièrement les conditions qui prévalaient lors de l'accident. Le principe de ventilation en présence comprend l'introduction d'air neuf par le dessus du silo à l'aide d'un « souffleur à fourrage » (ventilateur), et l'évacuation de l'air vicié par les écoutilles (ouvertures) existantes sur le toit de cette enceinte. Théoriquement, si suffisamment de temps s'est écoulé, la dilution effectuée dans le silo doit permettre une intervention sécuritaire de l'agriculteur; cependant, un travailleur a été asphyxié après avoir ouvert la porte d'un silo agricole pourtant ventilé par ce principe.

Les lacunes du principe de ventilation préconisé dans l'industrie ainsi que les effets particuliers d'éléments susceptibles d'influencer son efficacité, tels que la présence de videurs à silo, seront démontrés sur une base théorique. Sans prescrire de solution définitive, des pistes d'amélioration seront proposées dans le cadre de cette étude pour tenter de corriger les manques et ainsi **assurer une intervention sécuritaire en tout temps des agriculteurs à l'intérieur des silos.**

1.2 Objectifs du mandat

Les objectifs de ce mandat d'expertise consistent à :

- Évaluer de façon théorique l'efficacité de la ventilation à l'intérieur d'un silo (typique) à la hauteur de l'ensilage dans les conditions présentes aux moments de l'accident;
- Évaluer la pression d'air à l'intérieur du silo dans les conditions présentes juste avant l'ouverture de la porte située à la hauteur de l'ensilage;
- Produire des schémas visuels utilisables dans le rapport d'enquête et qui pourront servir de base à la préparation d'outils de communication afin de sensibiliser le milieu agricole;
- Améliorer la compréhension des mouvements d'air ainsi que celle des gaz dans ce type de silo et dans la chute avec les équipements en place tel que le videur à silo muni d'un déflecteur.



Ventilation sécuritaire des silos agricoles

Rapport technique

 Expertise de la ventilation du silo de la ferme
Melga

CNESST

2. MÉTHODOLOGIE

Afin de répondre aux objectifs du mandat, la méthodologie proposée par BBA consiste à :

1. Évaluer de manière théorique les conditions aérauliques ambiantes prévalant dans un silo, alors qu'un système de souffleur à fourrage est en marche (**ventilation par soufflage**), principe mis en œuvre dans l'industrie agricole et en place lors de l'accident; les éléments suivants identifiés au devis (CNESST) seront notamment inclus :
 - a. Débit d'air du souffleur (seul) avec et sans plaque de déflexion;
 - b. Vitesses du jet d'air à la surface d'ensilage.
2. Décrire succinctement, à l'aide de représentations schématiques et graphiques, les concepts de ventilation envisageables;
3. Produire un rapport d'expertise, avec conclusions et recommandations, incluant des illustrations qui permettront une meilleure compréhension des phénomènes en présence (notamment la différence entre les déplacements d'air en haut et en bas dans le silo – scénarios avec porte à 21 m [70'] de la chute ouverte et fermée).

3. CONFIGURATION DE LA VENTILATION DU SILO LORS DE L'ACCIDENT MORTEL

3.1 Description

Les conditions prévalant lors de l'accident mortel survenu à la ferme Melga incluent notamment :

- Un silo en métal vitrifié de type ouvert ayant 7,62 m [25'-0"] de diamètre et 30,48 m [100'-0"] de hauteur;
- Le silo est muni de trois (3) écoutilles sur le dôme qui étaient toutes fermées au moment de l'accident; seule la porte en haut de la crinoline (échelle extérieure) était ouverte;
- Un espace libre de 9,14 m [30'-0"] au-dessus de la surface d'ensilage en forme de beigne (voir Figure 1);
- Un souffleur à fourrage Val-Métal (modèle 540 RPM) avec un videur installé au sommet du silo muni d'une plaque de distribution orientée à 45 degrés vers la paroi opposée à la trappe d'accès ouverte par le travailleur;
- D'après un témoin, le moteur fonctionnait à 80 % de sa capacité maximale; le débit d'air a été mesuré à environ 5 000 m³/h pour une vitesse du moteur à 100 %. Par extrapolation, le débit d'air pour une vitesse du moteur à 80 % sera pris égal à 4 000 m³/h.
- Informations additionnelles reçues de la part de la CNESST :
 - Le processus de fermentation avait démarré depuis trois (3) jours;



Ventilation sécuritaire des silos agricoles

Rapport technique
Expertise de la ventilation du silo de la ferme
Melga

CNESST

- Le dernier voyage d'ensilage avait eu lieu en fin d'après-midi la veille de l'accident;
- Le lendemain (soit le jour de l'accident), le silo avait été ventilé en utilisant un souffleur à fourrage pendant une durée variant entre 30 minutes et une heure;
- Toutes les portes d'accès à l'intérieur de la chute étaient fermées;
- Seule la porte en haut de l'échelle extérieure était demeurée ouverte;
- Immédiatement avant l'accident, afin de niveler la surface d'ensilage, le travailleur était dans la chute et a ouvert la sixième porte d'accès à partir du haut, soit à une hauteur de 21,34 m [70'-0"] du sol; la victime a perdu conscience et a fait une chute de plus de 20 m.

Le schéma suivant (voir Figure 1) donne un bref aperçu des conditions qui prévalaient lors de l'accident telles qu'elles ont été rapportées par la CNESST.

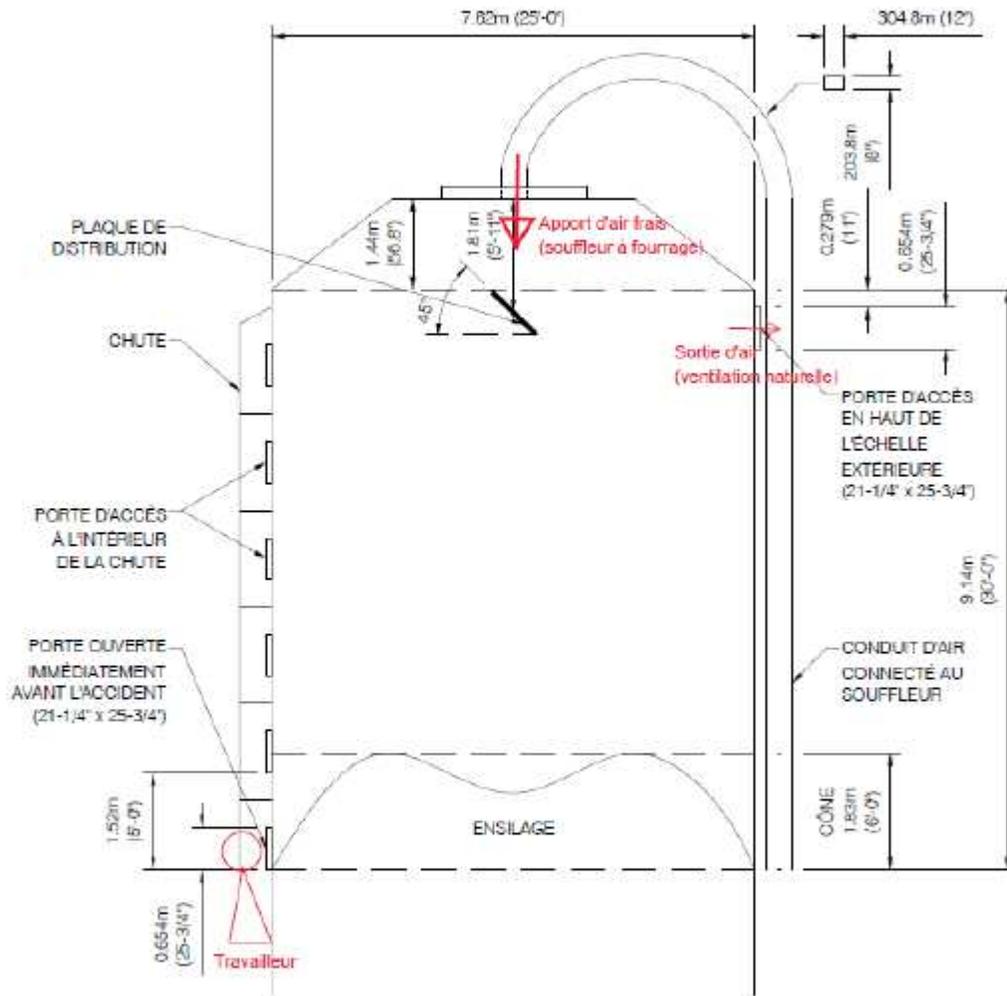


Figure 1 : Schéma des conditions prévalant dans le silo au moment de l'accident



Ventilation sécuritaire des silos agricoles

 Rapport technique
 Expertise de la ventilation du silo de la ferme
 Melga

CNESST

3.2 Processus d'ensilage et formation des gaz d'ensilage

L'ensilage est un processus de fermentation acide du matériel végétal qui se déroule en absence d'oxygène (O₂), soit en conditions anaérobies. Selon le document Canada Service Plan M-7410 Gaz d'ensilage, après la coupe et le hachage des plants dans les champs et leur soufflage dans le silo, lors d'une première phase qui dure environ une (1) journée, les plantes épuisent rapidement la quantité d'oxygène atmosphérique emprisonnée dans la masse végétale compactée. Pendant ce processus de respiration, l'oxygène présent dans l'air ambiant est transformé en eau (H₂O) et en dioxyde de carbone (CO₂), ce qui appauvrit en oxygène l'atmosphère à l'intérieur du silo. Dans des conditions optimales d'ensilage, presque tout l'oxygène dans la masse de matériel végétal est consommé en une (1) journée environ (Jones et al. 2004; Bachand, 1996).

Parallèlement à la production de CO₂, il peut y avoir production d'oxydes d'azote (NO_x) dans la masse végétale ensilée, et ce, dès les premières heures du processus.

Les vapeurs et les gaz plus lourds que l'air ont une densité relative supérieure à un (1) – valeur de référence. La densité relative des gaz émis lors du processus d'ensilage se trouve dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Densité relative des gaz d'ensilage (CO₂, NO, NO₂)

Gaz		Masse molaire	Densité relative (air = 1)	État à 20 °C
Formule	Nom	g/mol	-	-
CO ₂	Dioxyde de carbone	44,01	1,53	Gaz
NO	Monoxyde d'azote	30,01	1,04	Gaz
NO ₂	Dioxyde d'azote	46,01	1,59	Liquide ¹

En l'absence de ventilation, le silo se comporte comme un récipient étanche où les gaz lourds sont retenus. Les gaz générés lors du processus de fermentation, notamment le CO₂ et le NO₂, s'accumule donc dans l'espace libre du silo, en commençant par la partie basse au niveau de la surface d'ensilage en raison de leur densité plus élevée.

¹ A 20 °C, le dioxyde d'azote est un liquide très volatil jaune brun. A partir de 21 °C (son point d'ébullition), il existe sous forme de gaz rouge brun présentant une odeur très irritante.



4. SIMULATION AÉRAULIQUE ET EFFICACITÉ DE LA VENTILATION

4.1 Vitesse du jet d'air à la surface d'ensilage

De manière semblable à n'importe quel objet en mouvement dont la vitesse diminue avec la friction sur une certaine distance, la vitesse de l'air décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source d'admission (point d'alimentation). On appelle « jet d'air » ce phénomène d'évolution de l'air qui, dans tout son développement, inclut de l'induction (introduction d'air ambiant) et une expansion d'environ 30 °.

Hypothèses :

- Le débit d'air, Q_0 , est de 4 000 m³/h;
- Le conduit d'air a pour dimensions 0,2032 m x 0,3048 m [8 po x 12 po]; le diamètre équivalent de la gaine rectangulaire est de 0,2438 m; ce diamètre équivalent sera noté D ;
- La différence de température est négligeable, soit $t_0 = t_a$;
- Pour simplifier les simulations, le facteur de forme d'ouverture n'a pas été pris en compte.

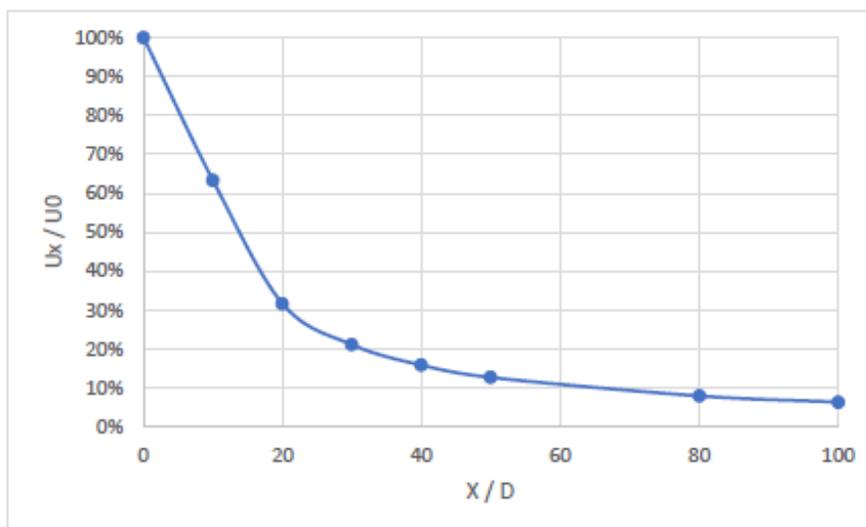


Figure 2 : Évolution du rapport U_x / U_0 en fonction de la distance X / D

La Figure 2 montre la réduction de la vitesse du jet d'air (en pourcentage) en fonction de la distance (X) à partir de la sortie du conduit d'air de diamètre « D » :

- Pour $X = 20D$, la vitesse du jet d'air est égale à 30 % de la vitesse initiale à la sortie du conduit d'air;

- Pour $X = 40D$, la vitesse du jet d'air n'est plus que de 15 % de la vitesse initiale à la sortie du conduit d'air.

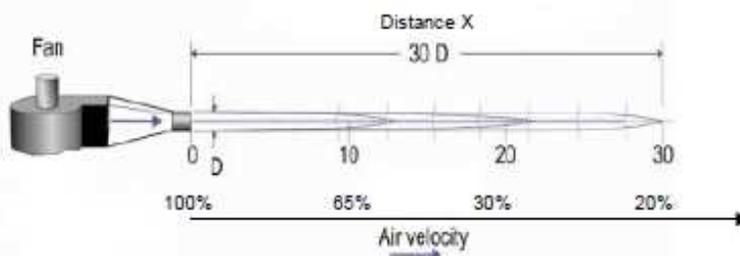


Figure 3 : Représentation schématique de l'évolution de la vitesse du jet d'air en fonction de la distance X

4.1.1 Sans plaque déflectrice

A des fins de comparaison, la vitesse de jet d'air a été estimée en fonction de la distance de la source dans le cas sans plaque déflectrice et les valeurs sont montrées au Tableau 2.

Tableau 2 : Vitesse au centre du jet d'air en fonction de la distance de la source (sans plaque déflectrice)

Distance de la source (jet d'air)	Vitesse estimée du jet d'air à 100 % de la puissance ²	Vitesse estimée du jet d'air à 80 % de la puissance ³
0 m (sortie du conduit)	22,4 m/s	17,9 m/s
5 m	7,6 m/s	5,7 m/s
10,58 m ⁴ (hauteur libre silo, situation de l'accident)	3,6 m/s	2,7 m/s

En l'absence de plaque déflectrice et avec un débit d'air de 4 000 m³/h (ce qui correspond à 80 % de la vitesse de rotation de l'arbre moteur), la vitesse du jet d'air à la surface d'ensilage serait de 2,7 m/s.

² À 100 % de la vitesse de rotation de l'arbre moteur (tracteur), le débit d'air mesuré est de 1,39 m³/s [2 945 PCM]

³ À 80 % de la vitesse de rotation de l'arbre moteur (tracteur), le débit d'air estimé est de 1,11 m³/s [2 355 PCM]

⁴ La hauteur du dôme est de 1,44 m et la hauteur libre dans la partie cylindrique est de 9,14 m, soit une distance totale de 10,58 m entre la sortie du conduit d'air et la surface d'ensilage au moment de l'accident.



4.1.2 Avec plaque défectrice

Une plaque de déflexion est présente dans le silo; étant donné que son aire est 13 fois plus grande que la section de la conduite d'arrivée d'air, elle dévie le jet provenant du conduit d'alimentation d'air frais de 90 degrés vers la paroi du silo. Cette obstruction crée une forte turbulence et fait en sorte que la résultante du jet d'air vertical à l'origine est essentiellement horizontale.

La Figure 7 montre que la composante horizontale du jet d'air est en grande partie court-circuitée par la sortie d'air induite par l'ouverture de la porte d'accès en haut de l'échelle extérieure.

A ce stade de l'étude, BBA considère le débit de la résultante verticale du jet d'air à 30 % de sa valeur d'origine.

Tableau 3 : Composante verticale de la vitesse au centre du jet d'air en fonction de la distance de la source (avec et sans plaque défectrice) pour un débit d'air correspondant à 80 % de la puissance

Distance de la source (jet d'air)	Sans la plaque	Avec la plaque
0 m (sortie du conduit)	17,9 m/s	17,9 m/s
5 m	5,7 m/s	1,5 m/s
10,58 m ⁵ (hauteur libre silo, situation de l'accident)	2,7 m/s	0,7 m/s

D'après le Tableau 3, la vitesse du jet d'air à la surface d'ensilage est estimée à 0,7 m/s [138 pi/min], ce qui représente une faible vitesse pour entraîner et forcer la dilution des gaz lourds accumulés à cet endroit.

4.2 Efficacité de ventilation (dilution par soufflage)

Dans le domaine aéraulique, la dilution se fait par l'ajout constant d'air frais dans un espace donné, dans le but de diminuer la concentration d'un contaminant dans l'air ambiant.

La dilution peut impliquer le déplacement d'un large volume d'air si les concentrations de contaminants sont élevées, ou si le volume de l'espace en question est important. Les mouvements d'air à l'intérieur d'un espace clos ou d'une pièce sont souvent complexes, car ils dépendent non seulement des débits, mais également des vitesses, des températures et de la masse volumique des contaminants en présence.

⁵ La hauteur du dôme est de 1,44 m et la hauteur libre dans la partie cylindrique est de 9,14 m, soit une distance totale de 10,58 m entre la sortie du conduit d'air et la surface d'ensilage au moment de l'accident.

Le schéma de la Figure 4 représente l'évolution de l'air dans une pièce ayant deux entrées et une sortie. Il est possible d'apercevoir dans les coins des zones stagnantes d'air (appelées zones mortes). Il faut donc considérer que l'efficacité de la dilution dépend de l'emplacement à l'intérieur de la pièce, mais également de l'emplacement et des caractéristiques des entrées et sorties d'air.

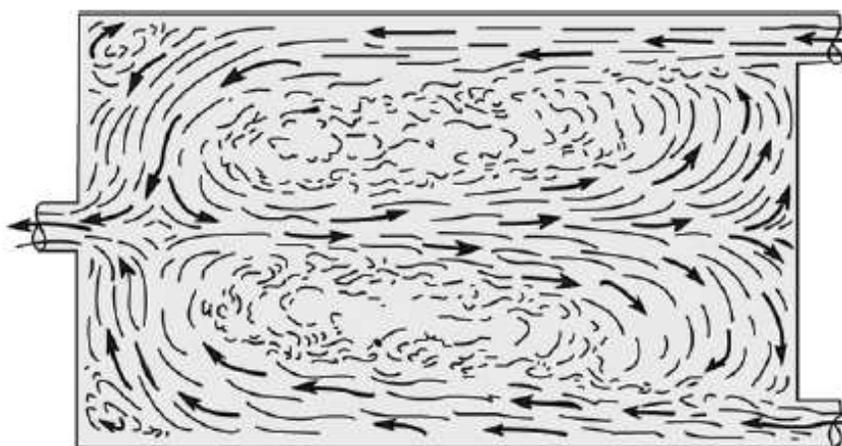


Figure 4 : Mélange de courants d'air (source : Baturin, 1972)

Il est important de noter que plus le volume vide d'un silo (c'est-à-dire l'espace libre au-dessus de l'ensilage) est important, plus il est difficile d'effectuer une dilution efficace puisque la formation de zones mortes est plus propice. Une attention sera donc portée à la taille des silos et à la hauteur d'ensilage.

Lorsqu'il est question de dilution, il est donc nécessaire de considérer l'efficacité avec laquelle la quantité d'air en présence contribue au mélange. Selon le livre de référence *Industrial Ventilation* de l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), l'efficacité de dilution est définie par le facteur « K ». Ce dernier est principalement établi selon :

- La configuration de la ventilation (emplacement des entrées/sorties d'air);
- Le balayage effectué dans l'espace ventilé (présence de zones mortes);
- L'exposition des travailleurs;
- La nature de la source de contamination;
- La toxicité des contaminants;
- La fiabilité des systèmes de ventilation en place (performances, entretien).



Ventilation sécuritaire des silos agricoles
Rapport technique
Expertise de la ventilation du silo de la ferme
Melga

CNESST

Il est donc clair que, dans des configurations différentes, la même quantité d'air n'effectue pas la même dilution. La Figure 5 montre certaines valeurs du facteur de dilution (K) en fonction de la configuration de la ventilation.

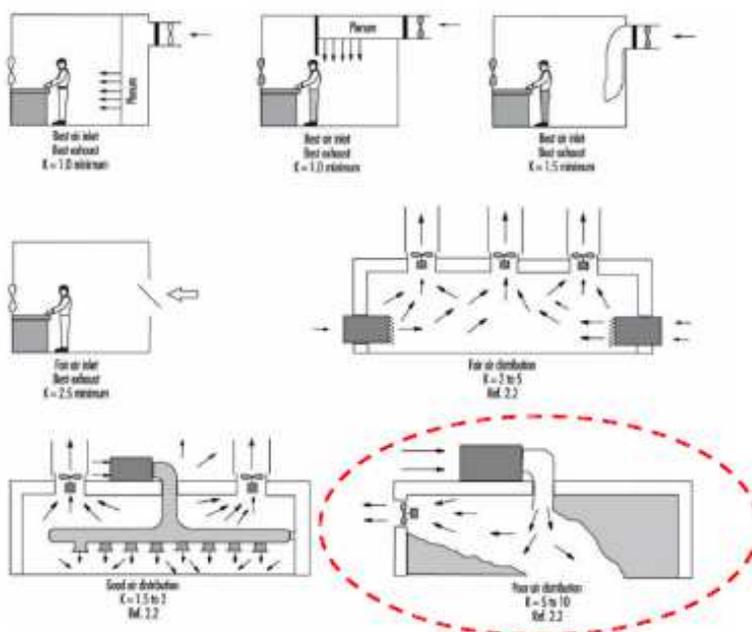


Figure 5 : Valeurs suggérées pour le facteur de dilution (K) selon différentes configurations

La figure encadrée (en bas à droite) représente le mieux les conditions qui prévalent dans un silo ventilé par le haut comme celui à l'étude; il faut cependant noter que la ventilation dans ce dernier cas est effectuée par aspiration.

Σ Dans le cas du silo de la ferme Melga, la ventilation est effectuée par soufflage (pressurisation) dans le but d'extraire des contaminants accumulés à une profondeur de 9,14 m [30'-0"] : de façon schématique, de l'air est envoyé dans un cylindre (espace libre du silo) depuis une ouverture située sur le dessus; l'air vicié sort par ventilation naturelle (sans aspiration) via une ouverture, elle aussi localisée en haut du silo (en haut de l'échelle extérieure). La proximité entre l'entrée et la sortie d'air empêche un balayage efficace de l'espace libre au-dessus de la surface d'ensilage (présence de zones mortes).

Le facteur de dilution K varie entre 1 (valeur minimale dans des conditions de distribution d'air optimale et de ventilation efficace) et 10 (valeur maximale dans des conditions de distribution d'air et d'efficacité de ventilation réduites par des facteurs aggravants).



Le tableau suivant présente les éléments pertinents à la détermination du facteur de dilution qui est établi à $K = 10$ pour la configuration de ventilation du silo de la ferme Melga.

Tableau 4 : Détermination du facteur de dilution (K) – Cas de la ferme Melga

Critère ou condition	Évaluation	Description complémentaire
Configuration de la ventilation	↓	Air poussé par le haut (plutôt que tiré) dans le silo Courte durée de fonctionnement du ventilateur avant l'intervention : moins d'une (1) heure avant l'accès
Balayage effectué dans l'espace ventilé	↓	Proximité entre l'entrée et la sortie d'air, un seul point de ventilation (alimentation et évacuation) Distance importante entre le fond de l'ensilage et l'alimentation d'air (hauteur du silo)
Nature de la source de contamination	↓	Génération de CO ₂ en continu (fermentation) Gaz émis (CO ₂ et NO _x) plus denses que l'air
Toxicité des contaminants	↓	Atmosphère raréfiée en oxygène (gaz asphyxiants)
Fiabilité des systèmes de ventilation en place	↓	Système de ventilation propulsé par un moteur de tracteur dont le réglage est effectué manuellement (levier)
Zones mortes	↓	Probabilité élevée que ces mêmes gaz lourds aient pu rester emprisonnés dans les creux de plus de 1,8 m [6'-0"] mesurés dans le silo après l'accident, la surface d'ensilage n'étant pas horizontale

Légende :

↓ : facteur aggravant ↔ : pas d'impact considéré ↑ : facteur d'amélioration des conditions

Le calcul du débit effectif se définit alors, en considérant le facteur « K », de la manière suivante :

$$Q' = \frac{Q}{K}$$

Où :

- Q' : débit de ventilation efficace ou effectif (m³/s ou PCM)
- Q : débit de ventilation réel (m³/s ou PCM)
- K : facteur de dilution (-)

Par exemple, si le débit d'air alimenté dans un espace clos comme un silo est de 1 m³/s (2 120 PCM), et si le facteur de dilution (K) est de 5, alors il faut considérer que le débit effectif contribuant réellement à effectuer de la dilution à l'intérieur de l'enceinte ne sera pas 1 m³/s mais plutôt 0,2 m³/s (424 PCM).



Ventilation sécuritaire des silos agricoles

Rapport technique

 Expertise de la ventilation du silo de la ferme
Melga

CNESST

Dans les deux (2) sections suivantes, les calculs effectués pour relater les conditions qui prévalaient lors de l'accident à la ferme Melga, sont montrés avec et sans la plaque de déflexion. Le débit d'air alimenté était de 1,11 m³/s [4 000 m³/h ou 2 352 PCM], ce qui correspond à une vitesse du moteur à 80 % de sa capacité maximale (tracteur).

4.2.1 Sans la plaque

Le délai minimal requis pour effectuer un changement d'air complet du silo peut être évalué à partir de l'équation suivante :

$$\Delta t = \frac{V}{Q'} = \frac{V \times K}{Q}$$

Où :

- V : volume d'air libre du silo (m³) (417 m³)
- Q : débit d'air (m³/h) (4 000 m³/h [1,11 m³/s])
- K : facteur de dilution (10)

Le délai minimal est évalué à 63 minutes pour effectuer un changement d'air complet de l'espace libre du silo (sans la plaque – conditions hypothétiques).

La figure suivante montre une représentation schématique des mouvements d'air et des zones mortes (indiquées par deux flèches courbées) dans le silo en l'absence de plaque.

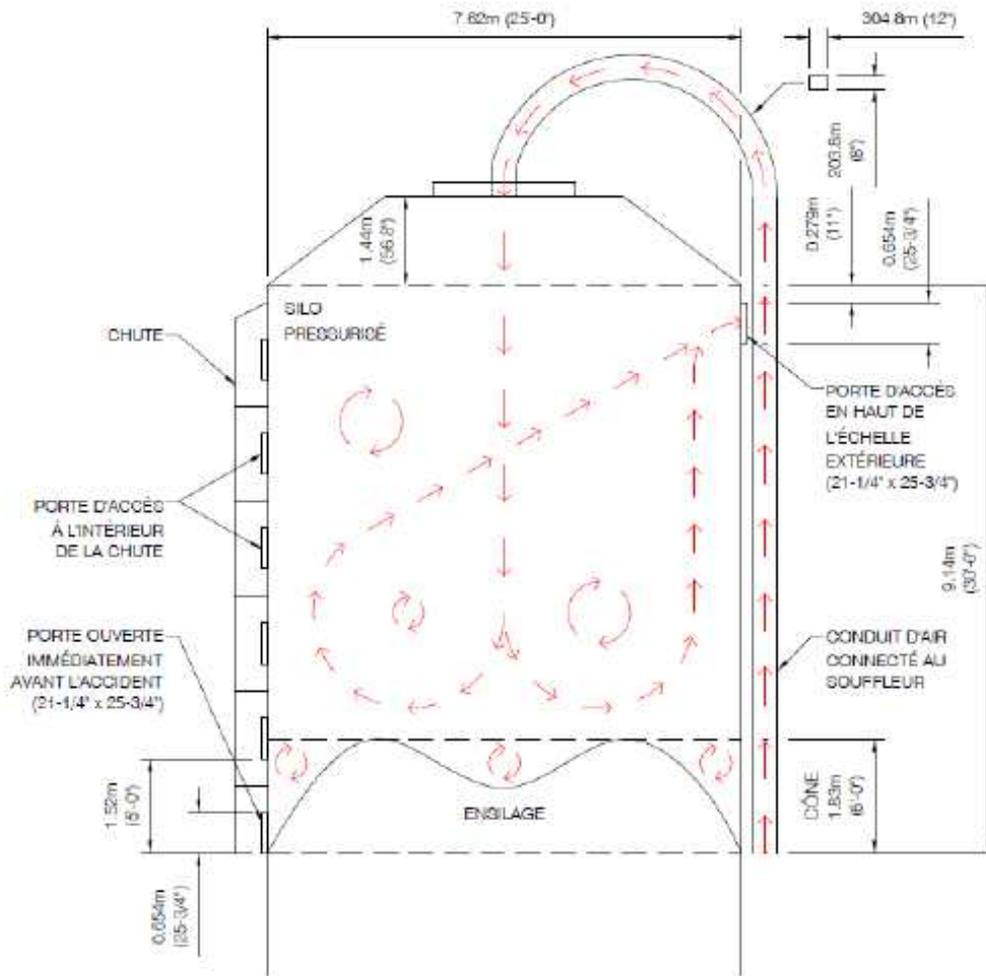


Figure 6 : Représentation des mouvements d'air dans le silo en l'absence de plaque déflectrice



Ventilation sécuritaire des silos agricoles

Rapport technique
Expertise de la ventilation du silo de la ferme
Melga

CNESST

4.2.2 Avec la plaque

Tel que discuté dans la section 4.1.2, la majorité du débit d'air frais est court-circuitée vers la porte d'accès vers l'échelle qui était ouverte (configuration de l'accident). A des fins de calculs, la composante verticale du jet d'air représente environ 30 % du jet d'air d'origine. Le débit effectif est alors de 1 200 m³/h [0,33 m³/s], ce qui représente un faible débit pour entraîner et forcer la dilution des gaz lourds accumulés au niveau de la surface d'ensilage.

En présence de la plaque déflectrice – situation prévalant lors de l'accident à la ferme Melga – le délai minimal requis pour effectuer un (1) changement d'air complet de l'espace libre du silo est de 208 minutes, soit près de trois (3) heures et demi.

Selon les informations obtenues par les responsables de l'enquête de la CNESST, le travailleur serait monté entre 30 et 60 minutes après la mise en marche du système de ventilation, ce qui est donc un délai inférieur à celui calculé précédemment. Après 30 minutes, seulement 15 % de l'espace libre dans le silo a été ventilé.

La figure suivante montre une représentation schématique des mouvements d'air et des zones mortes (indiquées par deux flèches courbées) dans le silo en présence de la plaque de déflexion.

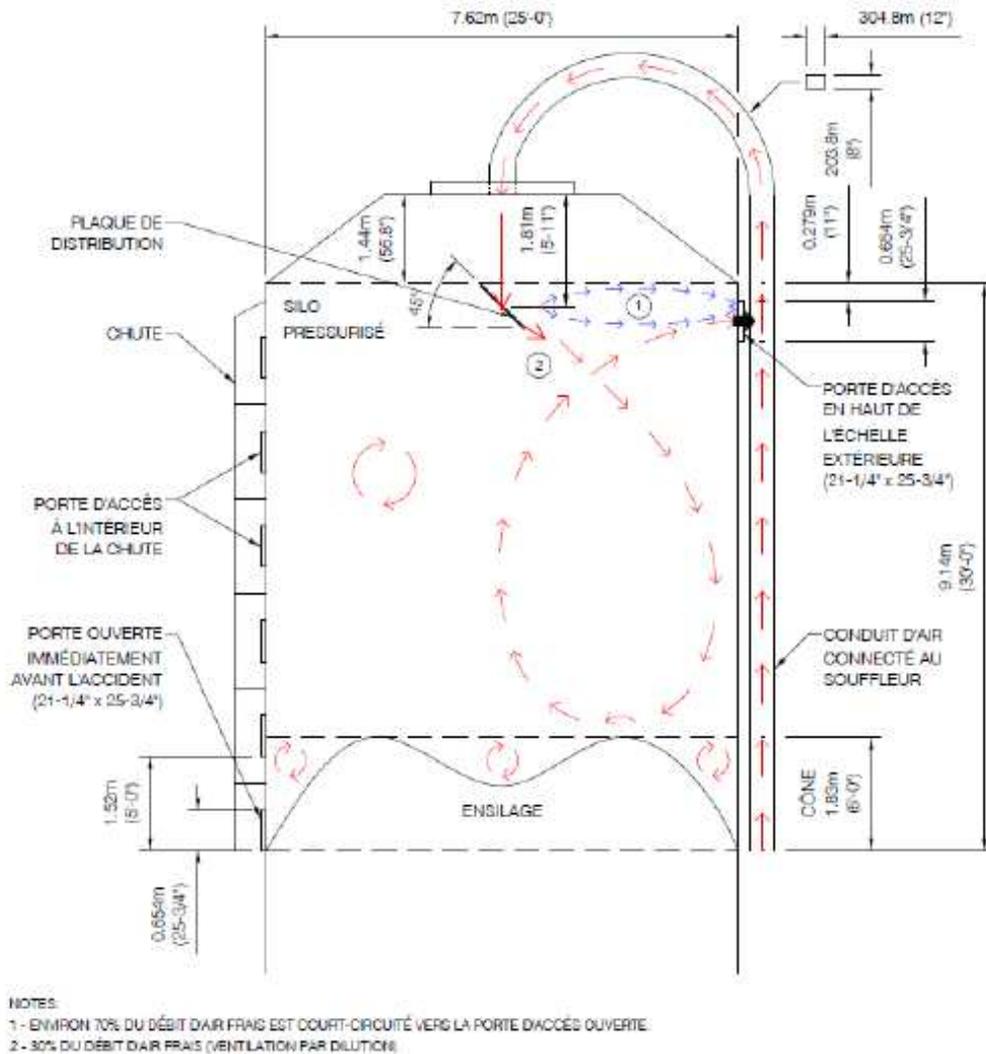


Figure 7 : Représentation des mouvements d'air dans le silo avec la plaque déflectrice (situation de la ferme Melga)



Ventilation sécuritaire des silos agricoles

Rapport technique
Expertise de la ventilation du silo de la ferme
Melga

CNESST

4.3 Pressurisation du silo

Lorsque la ventilation se fait par soufflage, une **pression positive** se crée dans l'enceinte et, dans ce cas précis, les contaminants sont susceptibles d'en sortir, provoquant ainsi la contamination des milieux environnants. L'ouverture d'une porte ou d'une trappe d'accès libère soudainement un espace suffisamment important pour que le chemin normalement emprunté par l'air pour sortir de l'enceinte soit modifié; la pression statique étant plus faible, l'air contaminé sort par l'ouverture ainsi créée.

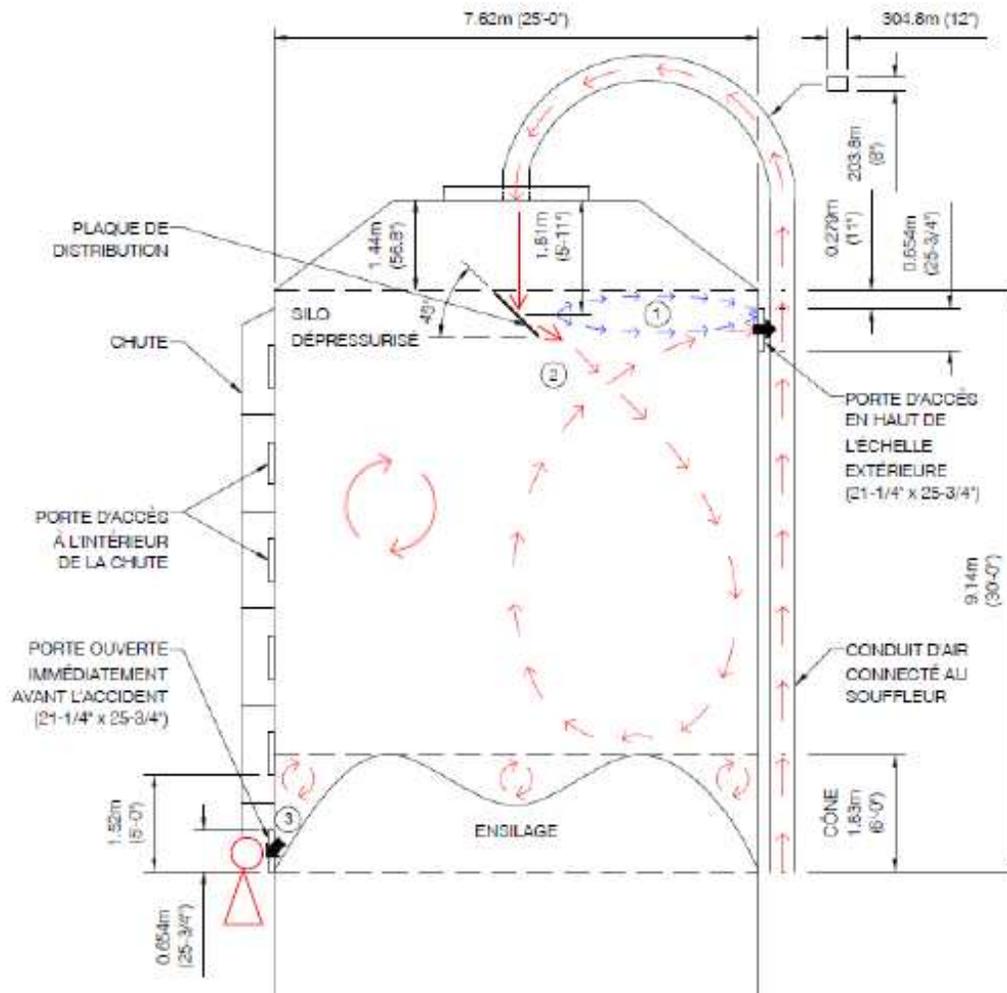
Δ Dans la situation à l'étude, le souffleur à fourrage alimente de l'air (frais) dans le silo à un débit évalué de 1,11 m³/s [2 355 PCM] via une bouche de ventilation (8" x 12").

Rappelons que seule la porte d'accès en haut de l'échelle à crinoline était ouverte durant la ventilation du silo.

A des fins de calculs, la pression positive à l'intérieur du silo a été évaluée comme équivalente à la perte de charge à travers l'ouverture de la porte d'accès (25,75" x 21,25"). Cette perte de charge a été évaluée à environ 20 Pa.

Au moment de l'ouverture, la pression positive à l'intérieur du silo était d'environ 20 Pa. La trappe d'accès représentant une aire relativement importante (25,75" x 21,25"), la pression se neutralise à l'intérieur du silo et l'air est évacué; il se crée donc un « nouveau » canal d'évacuation de l'air ambiant contenu dans le silo par l'ouverture (trappe ouverte). En ouvrant la porte dans la chute, le travailleur a contribué à la dépressurisation du silo.

Par ailleurs, étant donné que la porte d'accès est située au niveau de la surface d'ensilage, cette zone contenait principalement des gaz lourds tels que le CO₂ et le NO₂. Au moment de l'ouverture de la trappe d'accès dans la chute, le travailleur a été exposé à cette atmosphère raréfiée en oxygène (voir figure suivante).



- NOTES:
- 1 - ENVIRON 70% DU DÉBIT D'AIR FRAIS EST COURT-CIRCUITÉ VERS LA PORTE D'ACCÈS OUVERTE.
 - 2 - 30% DU DÉBIT D'AIR FRAIS (VENTILATION PAR DILUTION).
 - 3 - DÉPRESSURISATION DU SILO EN OUVRANT DE LA PORTE DANS LA CHUTE ET EXPOSITION DU TRAVAILLEUR À UNE ATMOSPHÈRE APPAUVRIE EN OXYGÈNE.

Figure 8 : Représentation des mouvements d'air dans le silo avec la plaque déflectrice (situation de la ferme Melga) juste après l'ouverture de la porte dans la chute



Ventilation sécuritaire des silos agricoles

Rapport technique

Expertise de la ventilation du silo de la ferme
Melga

CNESST

5. CONCLUSIONS

Après analyse exhaustive des conditions aérauliques qui prévalaient dans le silo au moment de l'accident, BBA tire les conclusions suivantes :

1. Sans plaque de déflexion, la vitesse terminale du jet d'air à la surface de l'ensilage étudié (profondeur de 10 m) est de 2,7 m/s [315 pi/min]; les gaz lourds situés à cet endroit seraient probablement entraînés par une telle vitesse après un délai de ventilation suffisant; pour un espace libre de 9,14 m [30'-0"], ce délai est estimé à un peu plus de 60 minutes;
2. La plaque de déflexion (45 degrés) du videur d'ensilage diminue considérablement la vitesse résultante à la surface de l'ensilage; à une profondeur de 10 mètres, cette vitesse est estimée à 0,7 m/s [138 pi/min]; les gaz lourds situés à cet endroit ne seront pas nécessairement entraînés et la dilution y sera moindre particulièrement dans les cavités;
3. Dans les conditions qui prévalaient dans le silo de la ferme Melga, le délai requis pour effectuer un (1) changement d'air complet et ainsi ventiler l'espace libre au-dessus de la surface d'ensilage est évalué à 208 minutes; après 30 minutes de ventilation, seulement 15 % du volume libre aurait été renouvelé;
4. La ventilation par soufflage induit une pressurisation du silo (de l'ordre de 20 Pa); l'ouverture de la porte d'accès dans la chute juste en face de la surface d'ensilage a dépressurisé le silo et a par conséquent exposé le travailleur à une atmosphère appauvrie en oxygène, essentiellement composée de CO₂ et NO_x (gaz plus lourds que l'air situés près de la surface d'ensilage);
5. Des facteurs aggravants – densité des gaz (gaz émis à la surface d'ensilage plus lourds que l'air), présence de zones mortes (emprisonnement des gaz dans les creux), pressurisation du silo, et émission continue de gaz – ont été identifiés et leurs effets cumulés pourraient expliquer les conditions d'asphyxie (anoxie) auxquelles le travailleur a été exposé; compte tenu de la configuration de l'espace à ventiler et de la position de l'entrée et de la sortie d'air, la ventilation par dilution dans le silo présente une très faible efficacité (K = 10).

6. RECOMMANDATIONS

6.1 Suite de l'étude

La démonstration théorique effectuée dans ce rapport permet de mettre en évidence que les conditions qui prévalaient dans le silo au moment de l'accident survenu à la ferme Melga étaient insuffisantes pour ventiler le silo de façon adéquate. Compte tenu de la fréquence avec laquelle les travailleurs agricoles accèdent à l'intérieur d'un silo à fourrage (plusieurs fois par semaine) et peuvent donc être exposés à un possible danger d'asphyxie (anoxie), les conditions de ventilation préconisées par l'industrie agricole doivent être revues.



Ventilation sécuritaire des silos agricoles

Rapport technique

 Expertise de la ventilation du silo de la ferme
Melga

CNESST

Si des résultats plus précis sont requis, ou si une démonstration visuelle est souhaitée par la CNESST, il est recommandé de :

- réaliser une maquette à l'échelle (silo et installation de ventilation) pour effectuer du traçage fumigène afin d'obtenir un résultat visuel probant sur support vidéo; ou
- effectuer une simulation de type CFD (résultats mathématiques et visuels); ou
- mener une campagne d'échantillonnage à l'échelle réelle dans le silo à l'étude (résultats empiriques et visuels).

6.2 Pistes de solutions

Afin de prévenir les accidents graves du même type que celui survenu récemment à la ferme Melga, et compte tenu des phénomènes mis en évidence dans cette étude, BBA préconise la mise en place des changements suivants dans l'industrie agricole (notamment pour les producteurs et les fabricants de silo) :

1. Évaluer la possibilité et les solutions d'implantation d'une ventilation par aspiration

En effet, la concentration d'un contaminant varie en fonction de la configuration de la ventilation (voir Figure 9⁶) ; les flèches (illustrations V0 à V5) montrent la direction des entrées / sorties d'air⁷. Alors que la configuration V0 (cas de base) correspond à un espace clos sans ventilation mécanique⁸ (forcée), l'observation des volumes V4 et V5 permet de constater que la concentration d'un contaminant est d'environ 10 fois plus élevée – et, par conséquent, la dilution 10 fois moins efficace – lorsque la ventilation forcée est poussée par le dessus (V5) plutôt que tirée par le dessous (V4); c'est d'ailleurs cette dernière configuration (aspiration ou drainage de l'air vicié par le bas) qui permet un meilleur contrôle des contaminants dans l'exemple illustré.

⁶ Référence : *Guidelines for work in confined spaces*, Exxon Corporation Medical Department cité dans INRS (ED 703)

⁷ L'absence de flèche indique l'absence de ventilation forcée

⁸ Seule des ouvertures sont présentes

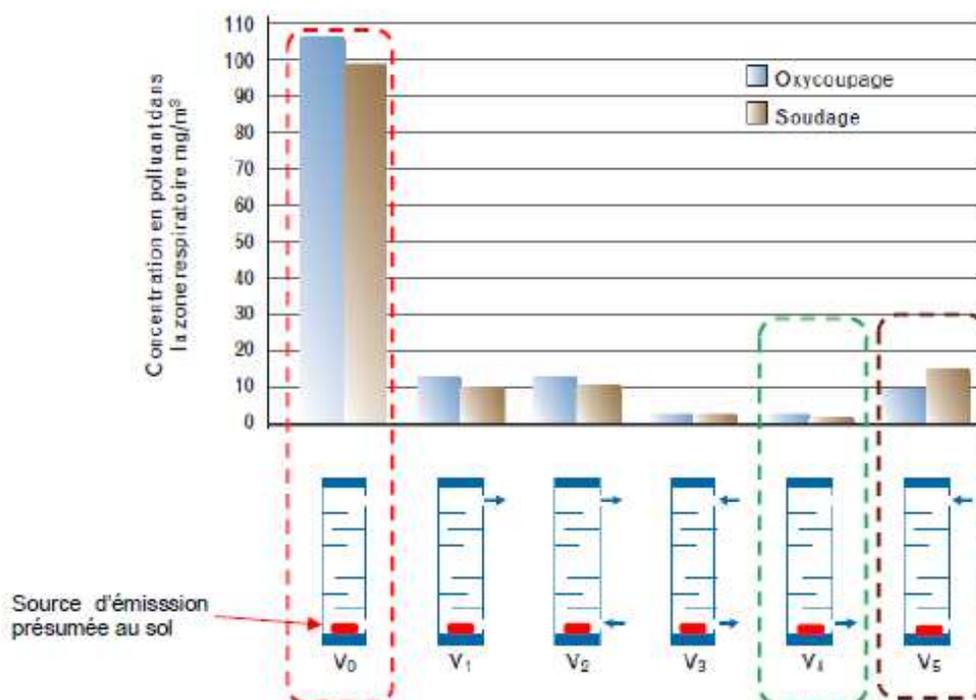


Figure 9 : Variation de la concentration de polluant en fonction de la position des entrées / sorties d'air dans le cas d'oxycoupage/ soudage « au sol »

Par ailleurs, le tableau suivant présente les avantages et inconvénients de la ventilation par soufflage et par aspiration.

Tableau 5 : Avantages et inconvénients de la ventilation par soufflage et aspiration dans le cas d'un silo ventilé

Type de ventilation	Avantages	Inconvénients
Soufflage (alimentation d'air) Pressurisation du silo	<ul style="list-style-type: none"> Simplicité du système, facilité d'installation et d'utilisation Faibles coûts d'implantation Dilution des contaminants (si les conditions sont adéquates) 	<ul style="list-style-type: none"> Contrôle plus difficile de la qualité de l'air ambiant Fuite des contaminants à l'extérieur de l'enceinte, notamment lorsqu'une ouverture est créée (ex. : trappe d'accès)



Ventilation sécuritaire des silos agricoles

 Rapport technique
 Expertise de la ventilation du silo de la ferme
 Melga

CNESST

Type de ventilation	Avantages	Inconvénients
Aspiration (évacuation d'air) Dépressurisation du silo	<ul style="list-style-type: none"> Meilleur contrôle de la qualité de l'air ambiant et des contaminants Pas de fuite vers l'extérieur de l'enceinte lorsqu'une ouverture est créée (ex. : trappe d'accès) 	<ul style="list-style-type: none"> Système plus complexe; nécessite des ajustements systématiques Plus difficile d'aspirer que de pousser; nécessite un dispositif plus complexe

- Identifier les dispositifs et équipements de contrôle susceptibles d'être installés sur des silos à fourrage (ex. : notamment installer un manomètre au refoulement du ventilateur afin de détecter lorsque le conduit d'air frais commence à s'encrasser; un conduit encrassé augmente la perte de charge du système et diminue le débit d'air à la sortie du ventilateur (souffleur));
- Revoir les délais jugés sécuritaires, avant d'accéder à l'intérieur de l'espace clos, en fonction de l'efficacité réelle de dilution, du volume d'espace libre au-dessus de la surface d'ensilage et des équipements en présence dans le silo tels que la plaque de déflexion du videur;
- Prévoir l'utilisation d'un harnais de sécurité ou de tout autre dispositif de protection contre les chutes (ex. : échelle avec rail ou ligne de vie);
- Revoir les procédures d'accès à l'intérieur des silos de ce type afin de prévenir la contamination de la zone respiratoire des travailleurs au moment de l'ouverture des trappes (ex. : détecteur gaz (CO₂, O₂, NO₂, NO), protection respiratoire).

Références

Voici la liste des intrants fournis par la CNESST :

- Fiche du fournisseur du videur à silo (VM-49_nordic_215_v8_pll);
- Photos du silo fournies par la CNESST (Photo_1);
- Schéma préliminaire du silo Melga (Melga_schéma préliminaire);
- Rapport d'expertise CNESST : estimation de la qualité de l'atmosphère à l'intérieur du silo en cause avant l'accident (juin 2019);
- Documentation complémentaire (CNESST pour BBA) incluant des photos;
- Rapport des dangers de gaz d'ensilage (PLAN M-7410 RÉVISION : 88.09);
- Fiche de données du souffleur d'ensilage (4916_valmetal_souffleur-ensilage_fr_v2);
- Présentation (Powerpoint) : Silos tours conventionnels et gaz d'ensilage (formation préventionnistes UPA);
- Relevés effectués par la CNESST (19-09-25 Résumé visite Ferme Melga).

Une revue des normes et règlements en vigueur a permis d'identifier tous les éléments requis et applicables en matière de qualité de l'air et d'espaces clos; il est à noter que les éléments relatifs aux émissions atmosphériques ainsi qu'à la gestion des risques d'incendie et d'explosion sont



exclus de la présente analyse. Le tableau suivant présente une liste exhaustive des lois, règlements et normes applicables au Québec et au Canada utilisés en références pour cette étude.

Tableau 6 : Documents de référence (Codes, normes et règlements)

Code du document	Titre du document
Lois et règlements	
RSST	Règlement sur la santé et la sécurité du travail, RSST, c. S-2.1, r.13
CNB	Code national du bâtiment
CNC	Code national de construction des bâtiments agricoles – Canada 1995
Standards, normes et références	
ACGIH	Industrial Ventilation, 30th edition
DC 200-16088	Le travail en espace clos (CSST, 2003)
RSST (S-2.1, r. 13., a. 302)	La ventilation dans un espace clos
INRS (ED 703)	Ventilation des espaces confinés, février 2015
INRS (ED 632)	Pas de vie sans oxygène, 1978
NFPA-91 2015	Standard for Exhaust Systems for Air Conveying of Vapors, Gases, Mists, and Particulate Solids
NFPA 350	Guide for Safe Confined Space Entry and Work
CSA-Z-1006-16	Gestion du travail dans les espaces clos



ANNEXE E

Références bibliographiques

1. ASSOCIATION CANADIENNE DE NORMALISATION. *Gestion du travail dans les espaces clos*, Toronto, CSA, 2016, 118 p. (CAN/CSA Z1006-16).
2. BAHLOUL, A , ROBERGE, B et GRAVEL, R. *Faisabilité de l'étude sur les gaz de fermentation et sur la ventilation en silo à échelle réduite*, [En ligne], Montréal, IRSST, 2008. vi, 25 p. (Études et recherches : substances chimiques et agents biologiques / IRSST ; R-553). [<http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSST/R-553.pdf>] (Consulté le 25 février 2020).
3. BAHLOUL, Ali, et autres. *La prévention des intoxications dans les silos à fourrage*, [En ligne], Montréal, IRSST, 2011, x, 53 p. (Études et recherches : substances chimiques et agents biologiques / IRSST ; R-672). [<http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-672.pdf>] (Consulté le 25 février 2020).
4. CANADA SERVICE DE PLANS. *Danger gaz d'ensilage, plan M-7410*, [En ligne], 1988, 9 p. [https://www.agrireseau.net/documents/Document_93854.pdf] (Consulté le 25 février 2020).
5. FOURNIER, Alain. *La production de gaz toxiques dans les ensilages, qu'en est-il ?*, [En ligne], (Bovins laitiers, Fiches techniques), Agri-Réseau, 1999, 3 p. [<https://www.agrireseau.net/bovinslaitiers/documents/bov16.pdf>] (Consulté le 25 février 2020).
6. JIANG, S., et autres. « Toxic gas production and silo ventilation », *Canadian Agricultural Engineering*, Vol. 33, no 1, 1991, p. 151-159.
7. NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. *Guide for safe confined space entry and work*, Quincy, Mass., NFPA, 2018, 102 p. (NFPA 350:2019)
8. REID, W.S., et autres. « Silo gas: production and detection », *Canadian Agricultural Engineering*, Vol. 26, no 2, 1984, p. 197-207.
9. COMMISSION DES NORMES, DE L'ÉQUITÉ DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ DU TRAVAIL. *Répertoire toxicologique*, [En ligne], 2019. [<https://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/Pages/repertoire-toxicologique.aspx>] (Consulté le 25 février 2020).
10. QUÉBEC. *Règlement sur la santé et la sécurité du travail, RLRQ, chapitre S-2.1, r.13, à jour au 30 janvier 2019*, Québec, Éditeur officiel du Québec, 2019, 125 p.