



La prévention des intoxications dans les silos à fourrage

Ali Bahloul, Brigitte Roberge et Nicole Goyer / IRSST

Mauricio Chavez et Marcelo Reggio / École polytechnique de Montréal

Avec la collaboration de :

Rodrigue Gravel, Bernard Caron, Yves Beaudet et Pierre Drouin / IRSST



MISE EN CONTEXTE

Types de silo



Silo à grains

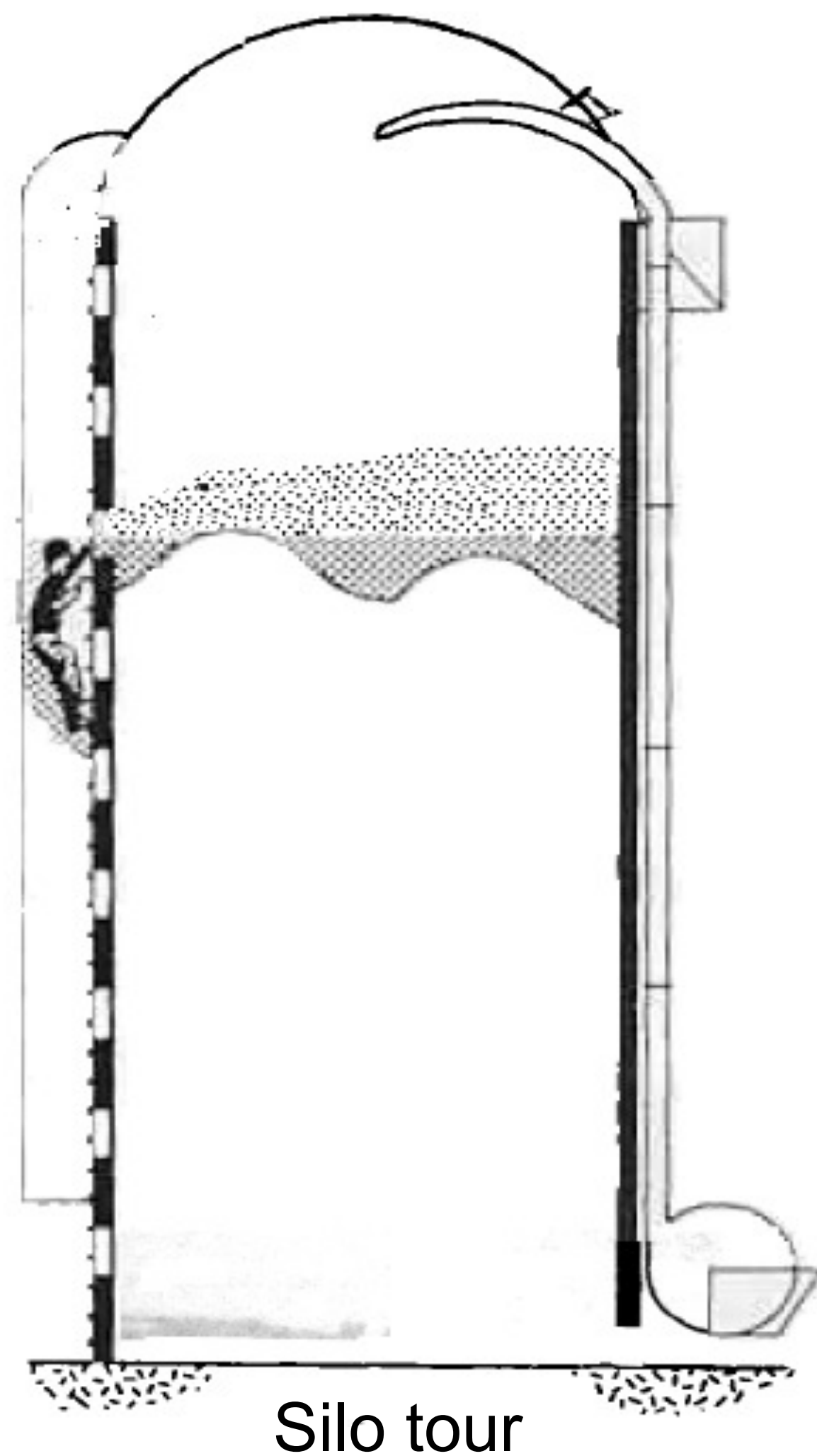


Silo à fourrage
hermétique



Silo à fourrage
conventionnel

MISE EN CONTEXTE



Silos conventionnels

Espaces clos :
chute, inhalation de gaz,
problèmes respiratoires, etc.

Fermentation de fourrage :

- Gaz toxiques et asphyxiants :
 CO_2 , NO_x , H_2S , CH_4
- Déficience en oxygène

Présence microbienne : levures et
moisissures

MISE EN CONTEXTE

Les valeurs d'exposition admissibles du RSST :

	Valeur d'exposition moyenne pondérée (8 heures)	Valeur d'exposition de courte durée (15 minutes)
CO ₂	5 000 ppm	30 000 ppm
NO ₂	3 ppm	-

Le taux d'oxygène ne doit pas être inférieur à 19,5 % (article 40)

Taux d'oxygène: 19,5 % à 23 %

MISE EN CONTEXTE

- Au Québec, moyenne de *10 accidents mortels par année* en espace clos
- *60 % d'accidents fatals* font suite à une tentative de sauvetage dans un espace clos (CCHST)
- *1990 - 2005 : 47 accidents mortels* par intoxication (PCSBMA) dont *15 % attribués* à l'inhalation des gaz de fermentation des silos à fourrage
- *2000 - 2005 : 15 dossiers* ont été ouverts à la CSST dont le tiers est relié à des silos à fourrage (PCSBMA)
2 intoxications, 3 chutes

OBJECTIFS

Demande conjointe CSST - UPA

- Documenter la période critique de fermentation du fourrage et de production de gaz toxiques;
(ferme laitière en Montérégie)
- Déterminer les débits et les caractéristiques d'un système de ventilation pour des silos verticaux à fourrage ou à tour conventionnelle; **temps de ventilation**
(CFD & expérience concept silo à échelle réduite)
- Documenter l'utilisation d'instruments de détection des gaz, en ce qui a trait aux limites et contraintes dans le cadre d'une procédure d'entrée en espace clos.

Documentation des gaz : méthodologie

- À l'intérieur du silo



Documentation des gaz : méthodologie

- À l'intérieur du silo



Documentation des gaz : méthodologie

- À la sortie de la chute du silo (salle d'alimentation), lors de la reprise du fourrage pour nourrir les animaux



Documentation des gaz : Résultats

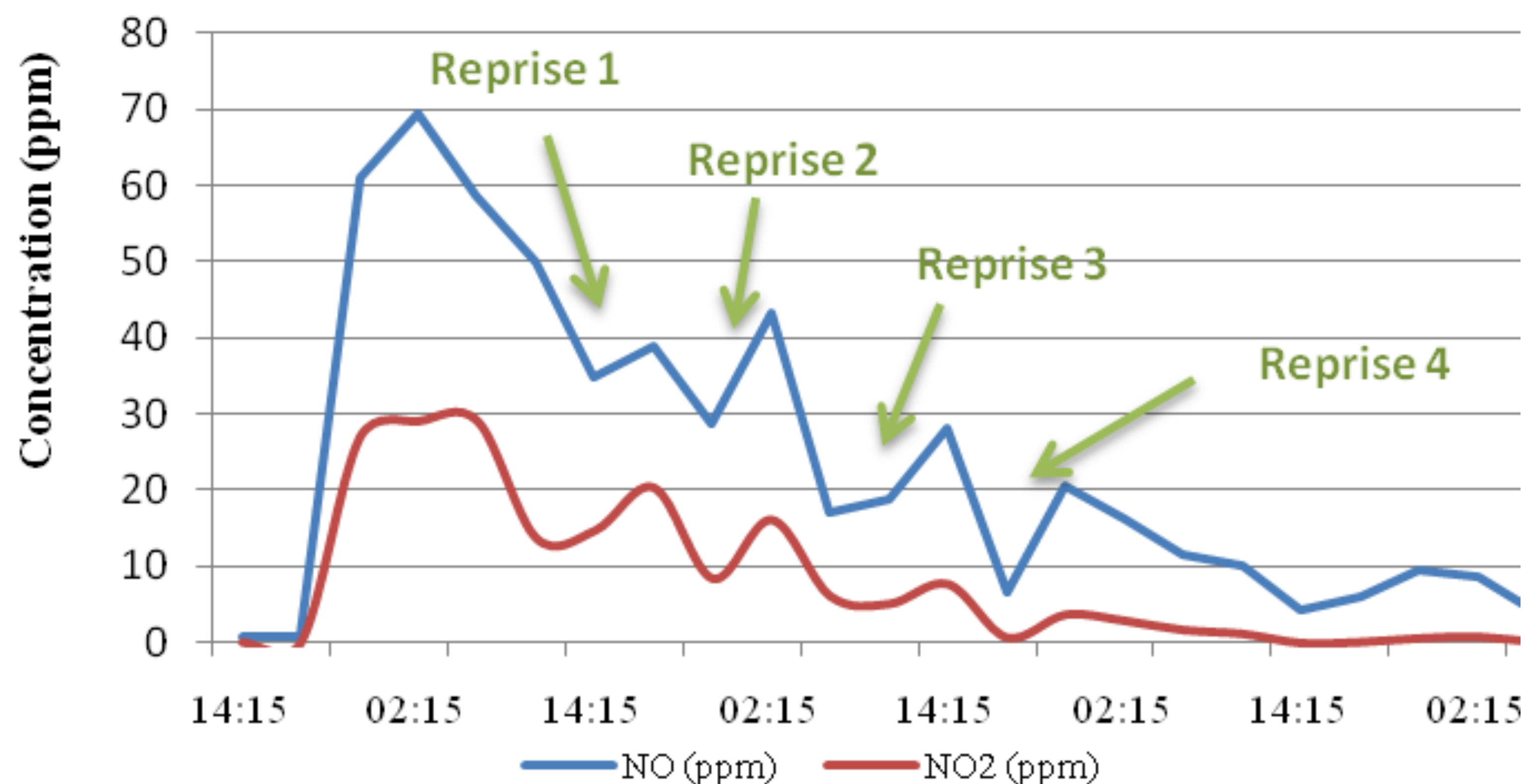
À l'intérieur du silo

Concentration (max ou min) des gaz

Silo	Date	CO ₂ (%)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	O ₂ (%)
1	Juillet	1,2	69	29	19,4
	Août	0,9	24	3,6	19,3
	Octobre	1,6	9	2,1	19,5
2	Octobre	0,8	2	< 0,1	19,5
3	Octobre	3,8	< 1	< 0,1	19,9

Documentation des gaz : Résultats

Lecture des gaz à l'intérieur du silo Reprises quotidiennes du fourrage



Documentation des gaz : Résultats

Concentrations maximales à la sortie de la chute du silo #1 lors de reprises du fourrage

	CO ₂ (%)	NO (ppm)	NO ₂ G (ppm)	NO ₂ D (ppm)	NO ₂ C (ppm)
22 août	1,65	48	5,4	7,4	2,8
23 août	1,62	23	3,7	6,7	25
24 août	0,93	3	< 0,5	< 0,5	<0,5

Documentation des gaz : Discussion

■ Points importants : dans le silo

- Augmentation des niveaux de CO₂
- Diminution du niveau d'oxygène (21 % à 19,4 %)
- Présence d'oxydes d'azote immédiatement après l'ensilage
- Présence de gaz de fermentation dans la salle d'alimentation (dans zone du producteur qui prépare les mélanges d'aliments)

■ Une situation d'un producteur

■ Au cours d'une saison

■ Période de fermentation critique non respectée

Instrument de mesure

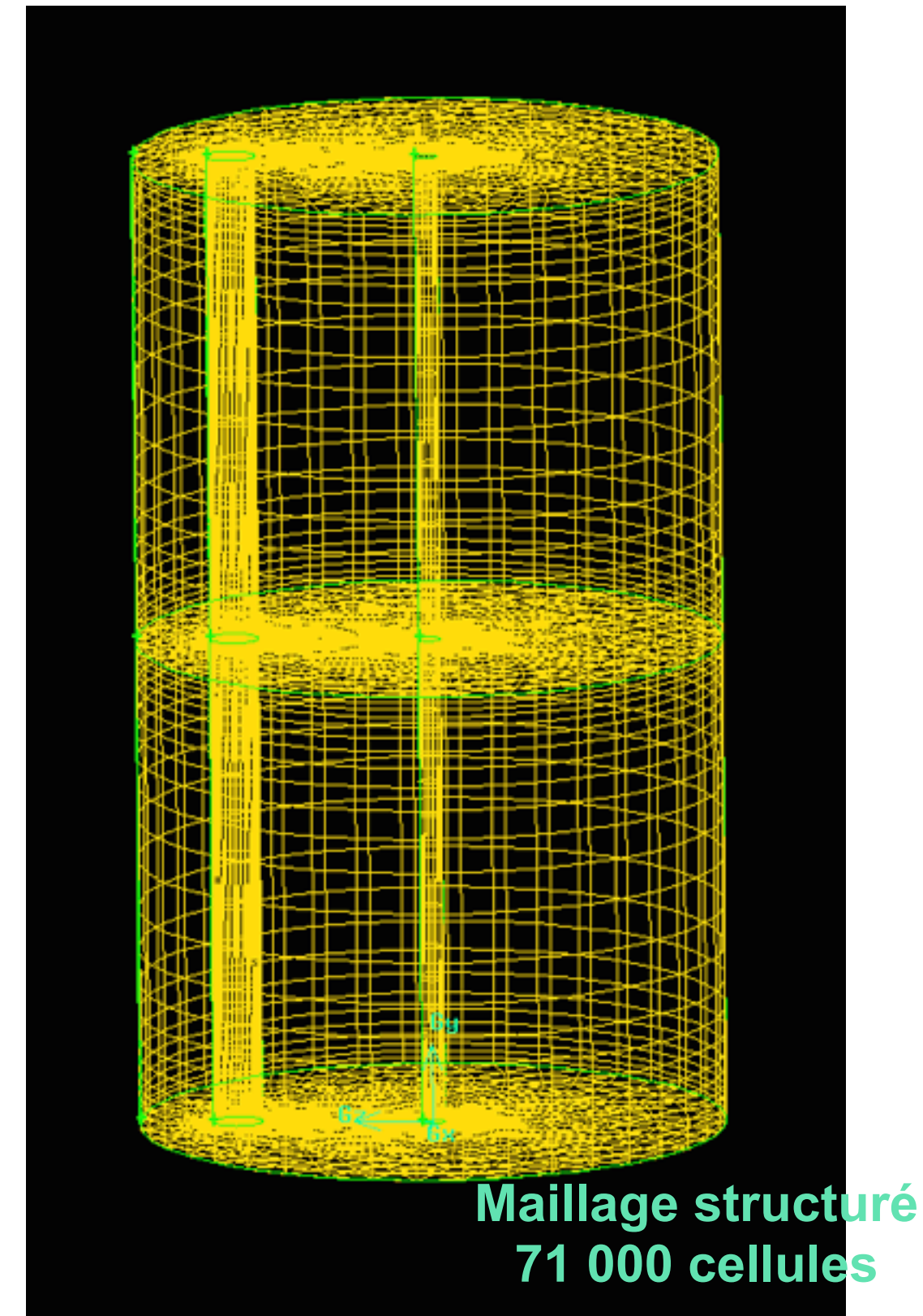
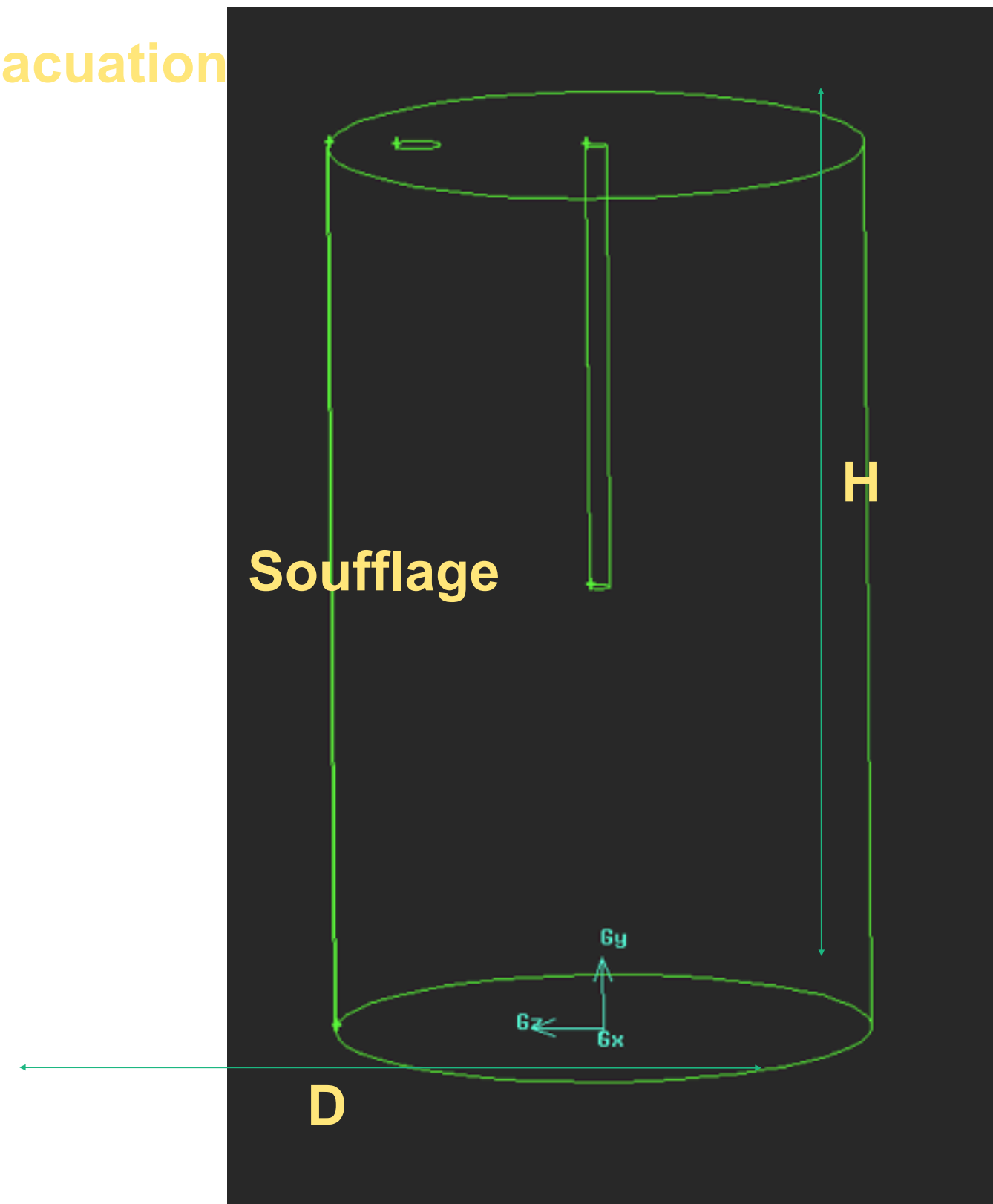
- Espace clos
- Entrée rapide suite à la survenue d'un problème:
 - Entretien
 - Temps de stabilisation
 - Étalonnage
 - Gaz étalon avec date de péremption pour les oxydes d'azote
 - Vérification des paramètres de fonctionnement
 - Stratégie de mesure en espace clos : accès en hauteur via un espace clos (chute)

NÉCESSITÉ DE VENTILER

MÉTHODOLOGIE

Logiciel commercial Fluent (CFD)

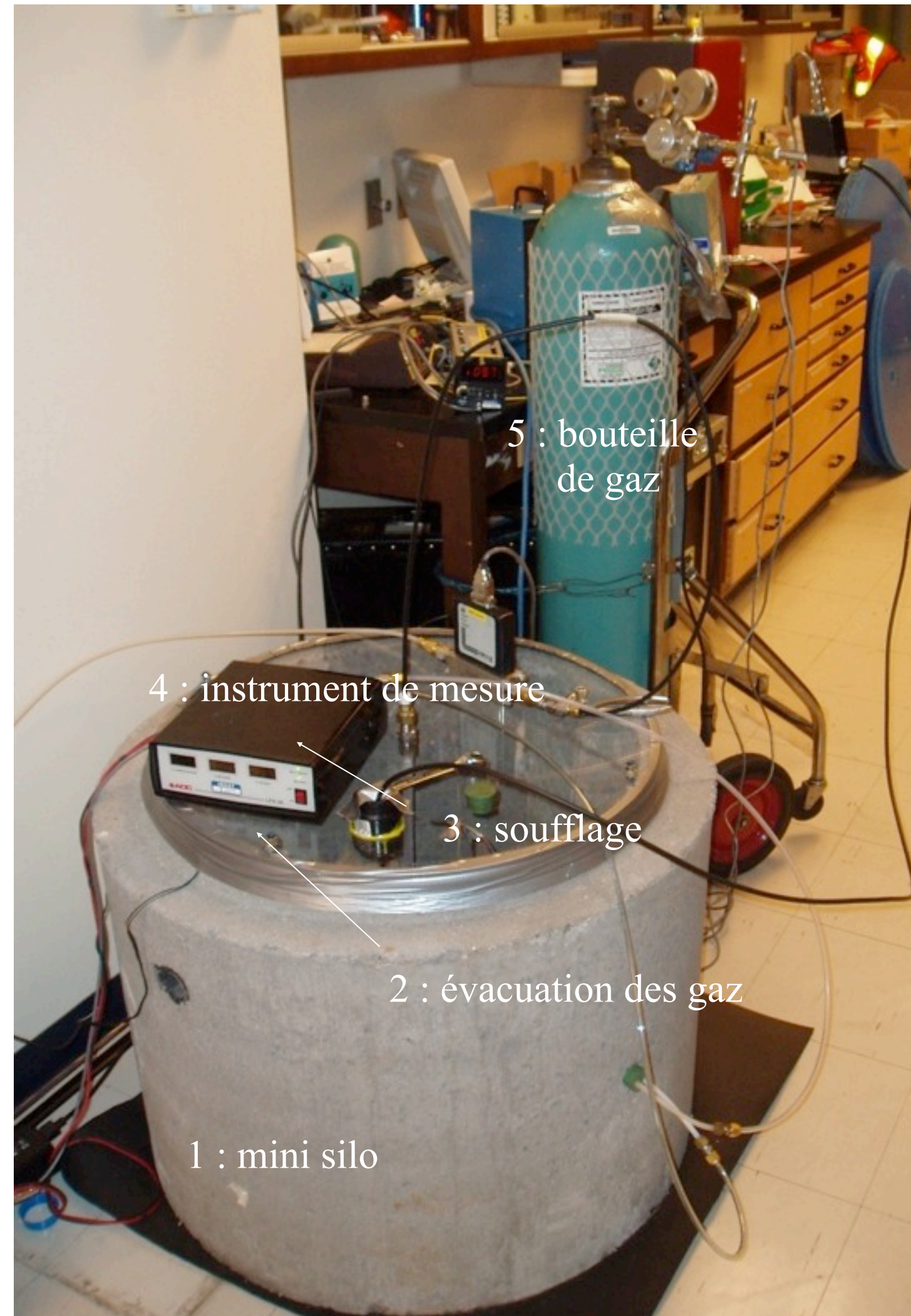
Évacuation



H est la hauteur de l'espace libre du silo; D est le diamètre du silo
Modèle numérique d'un espace libre de silo de 10 m de hauteur et 6 m de diamètre

MÉTHODOLOGIE

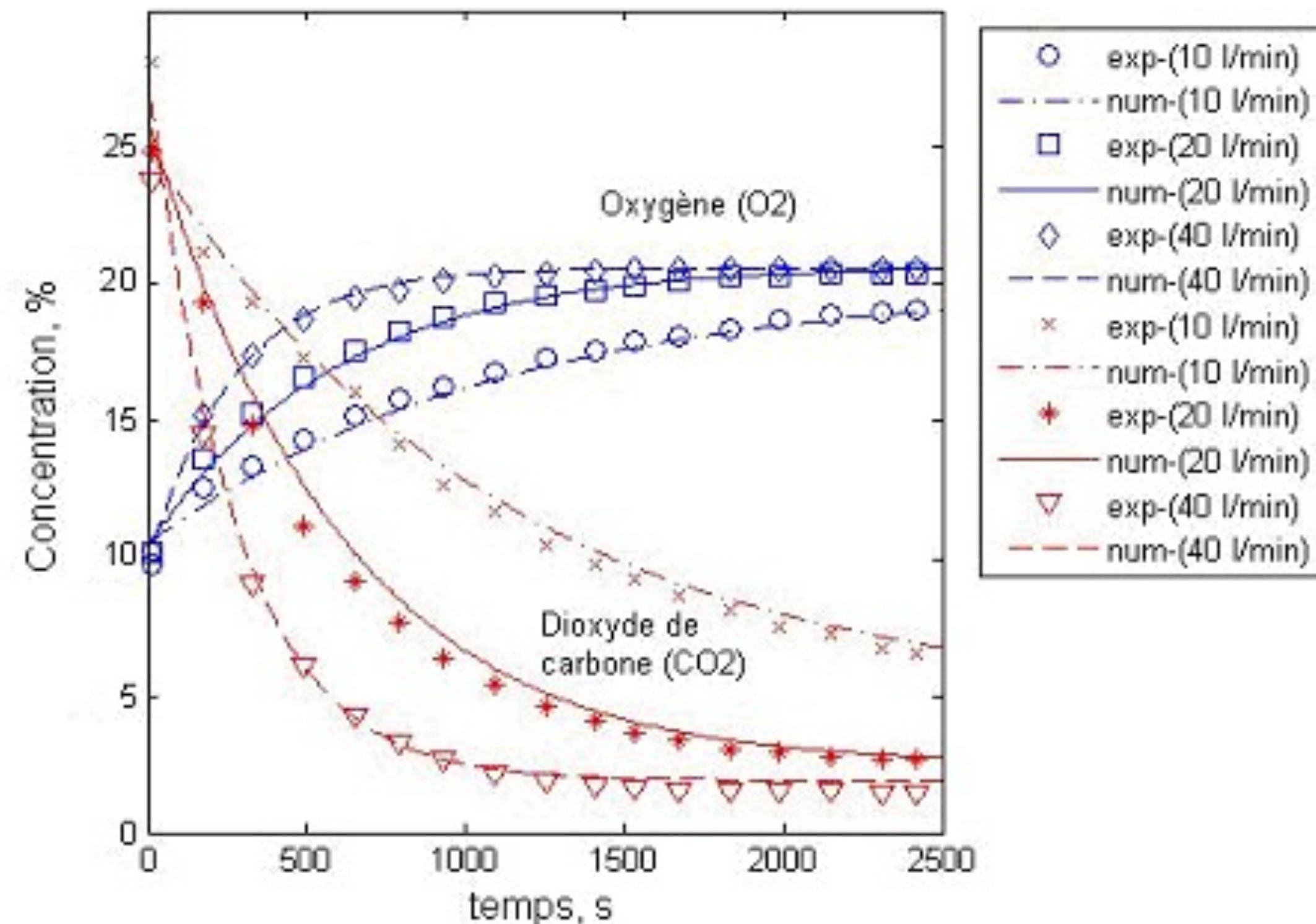
Tests expérimentaux



Installation expérimentale
du silo à échelle réduite

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Validation des calculs de simulations numériques



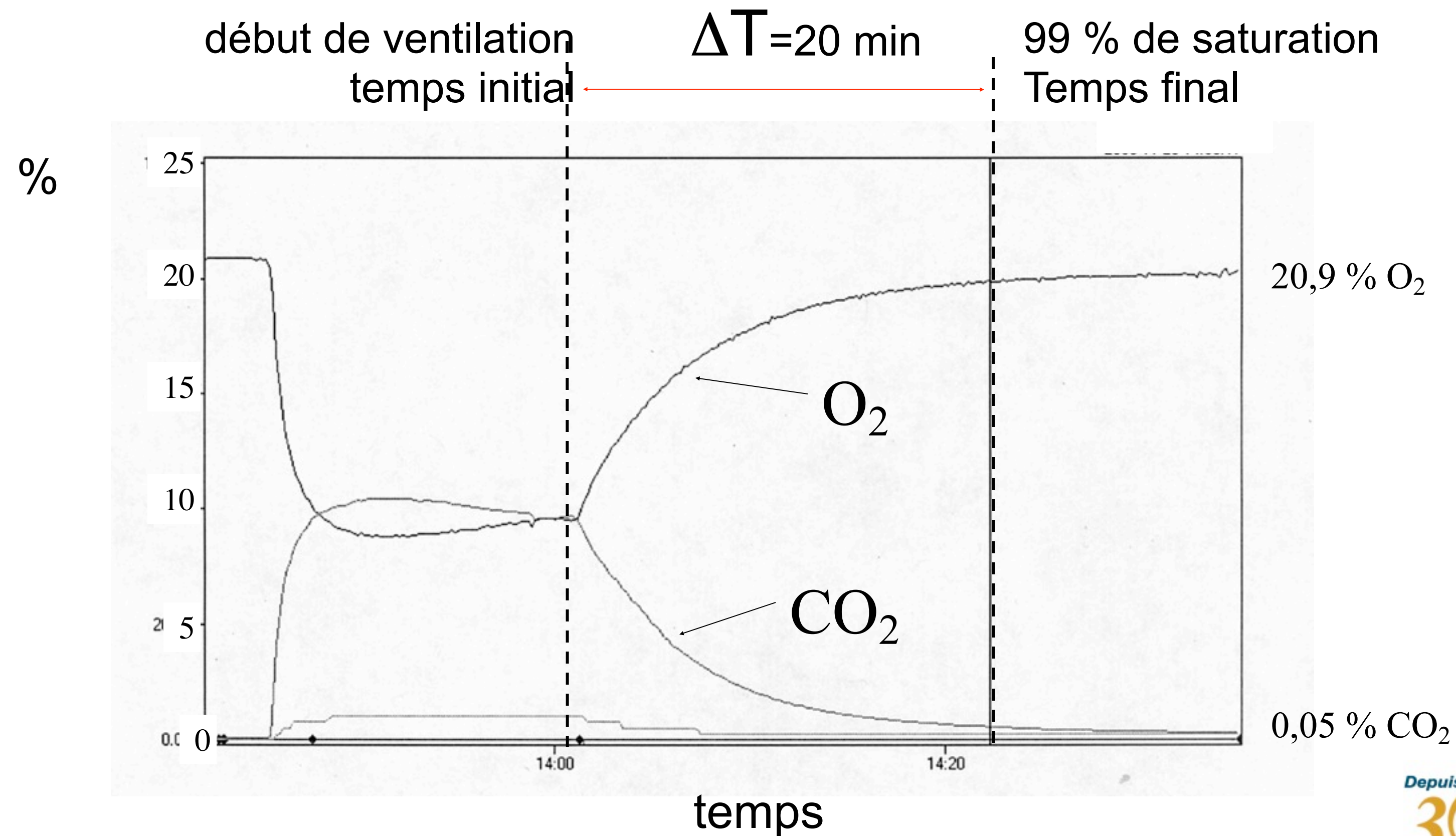
Comparaison des temps de ventilation théoriques et expérimentaux

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Détermination du temps de ventilation

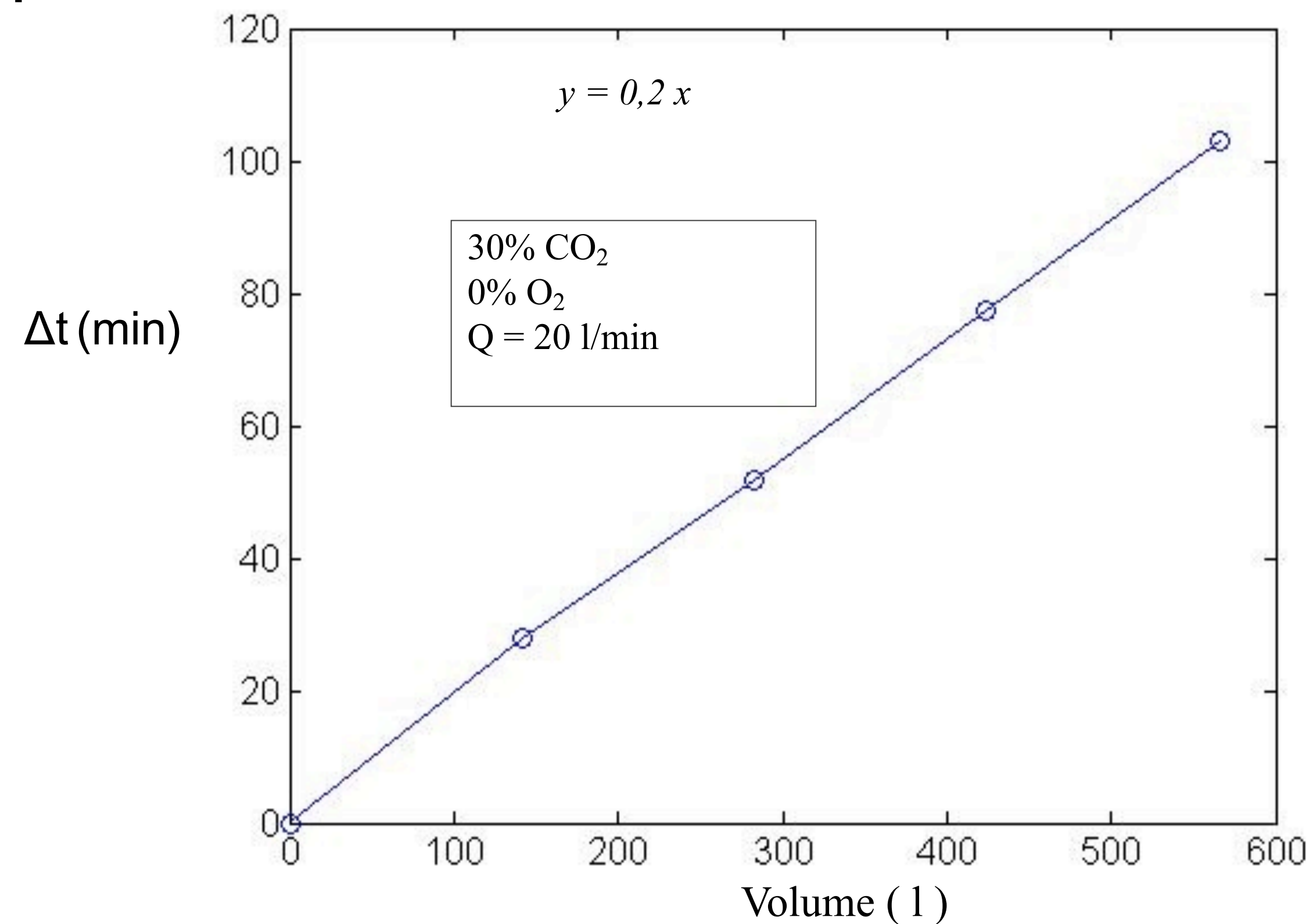
Débit = 20 L/min, Volume = 120 L

Exemple de calcul



RÉSULTATS ET DISCUSSION

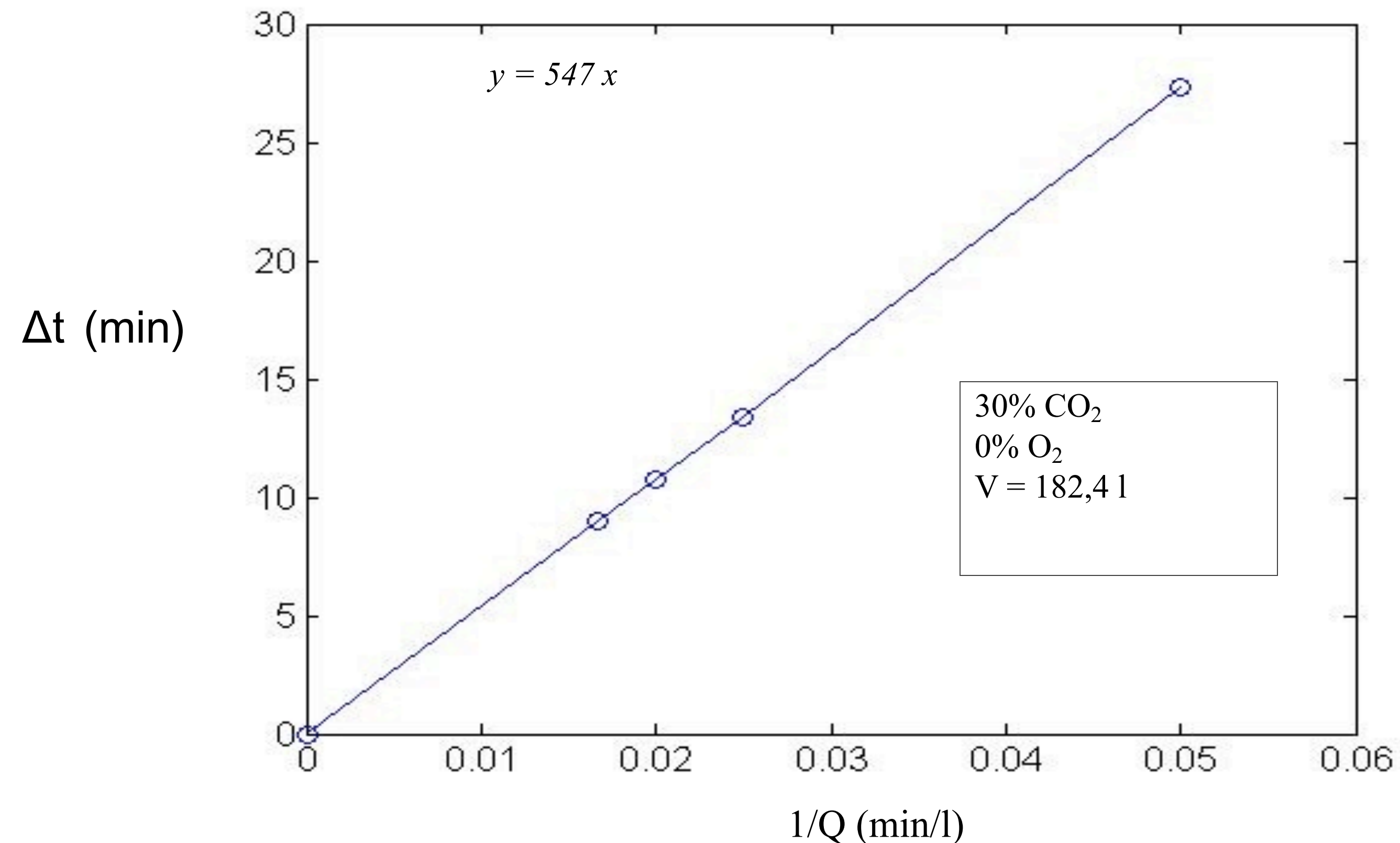
Étude paramétrique



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

RÉSULTATS ET DISCUSSION

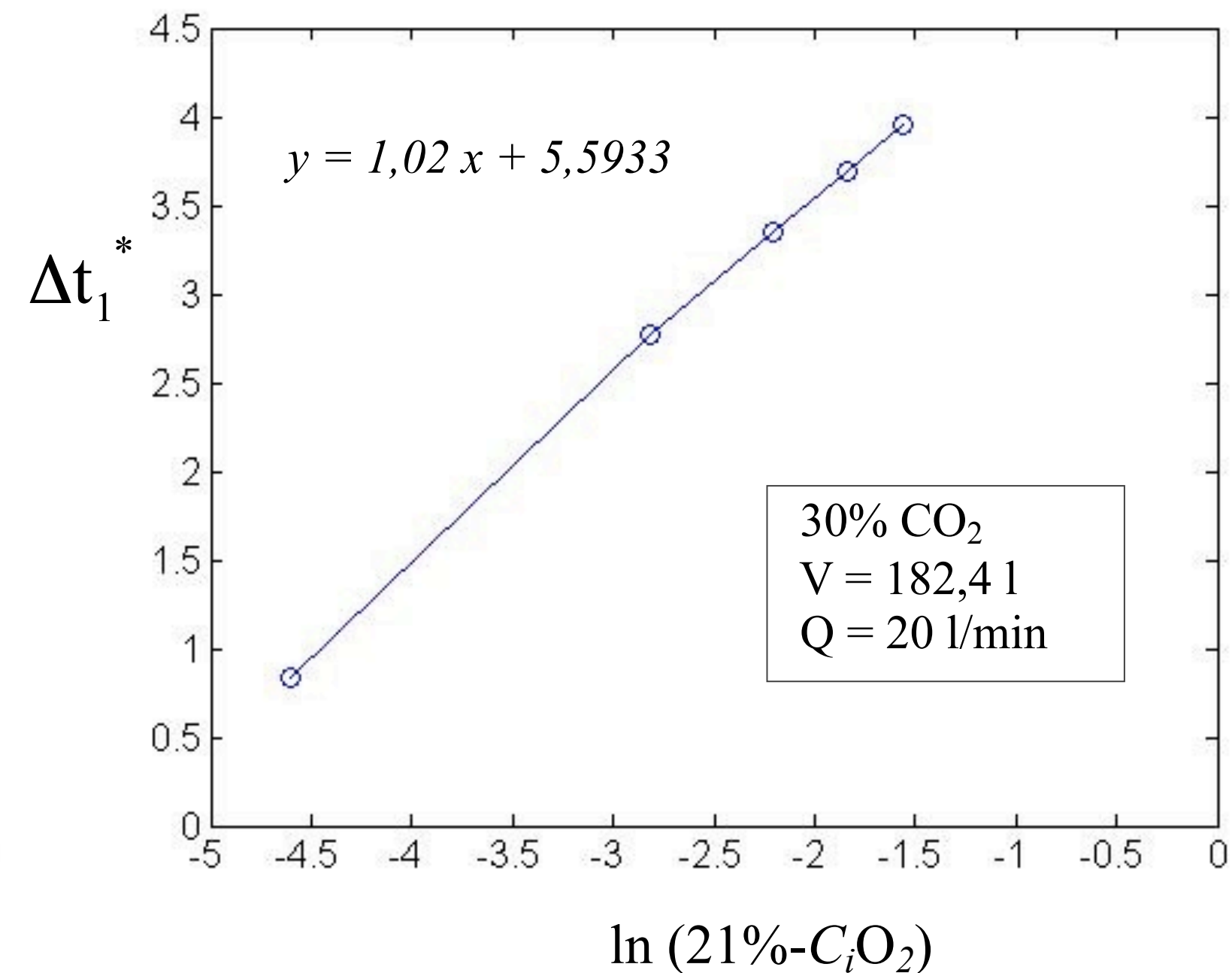
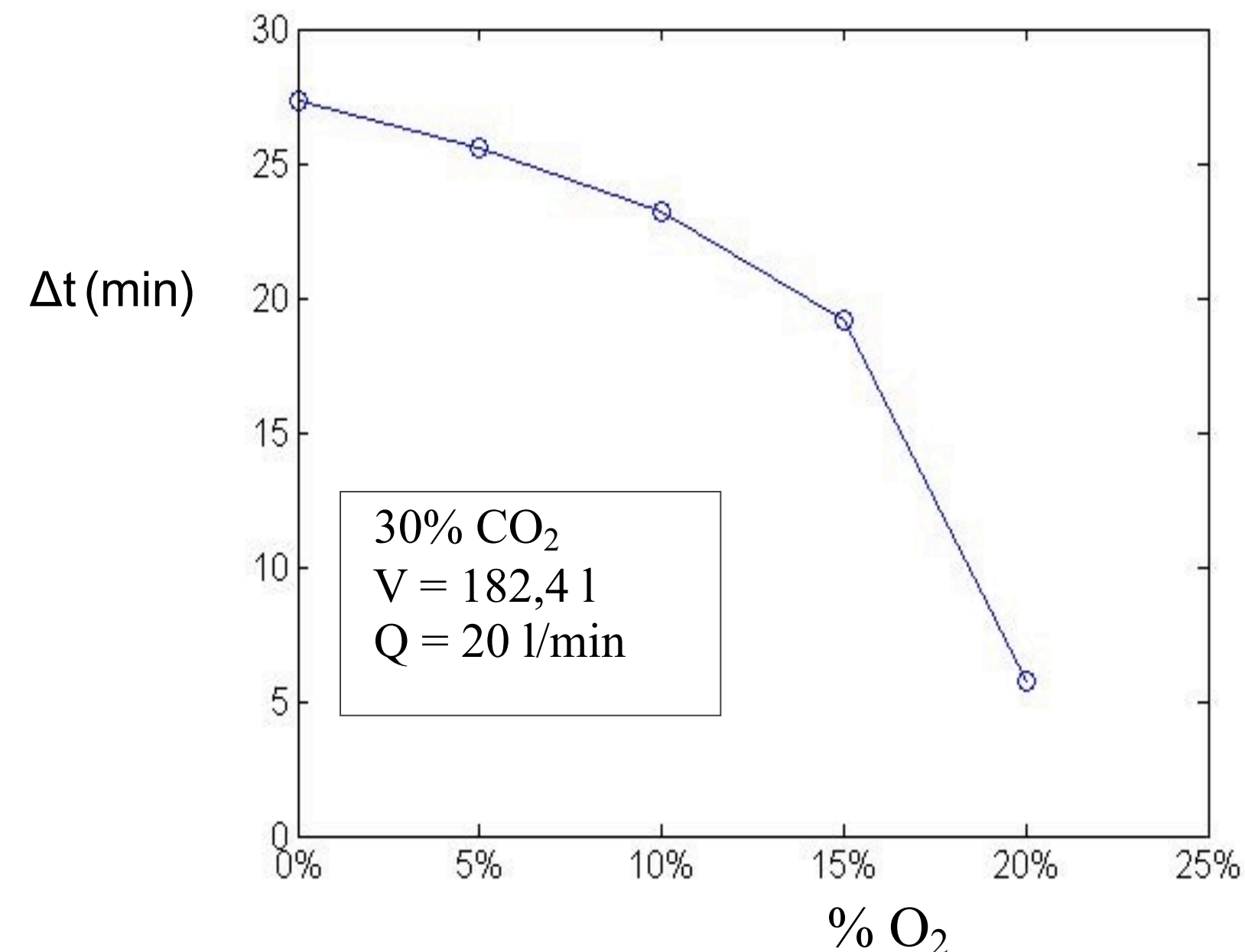
Étude paramétrique (suite)



Temps de ventilation en fonction du débit de ventilation

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Étude paramétrique (suite)

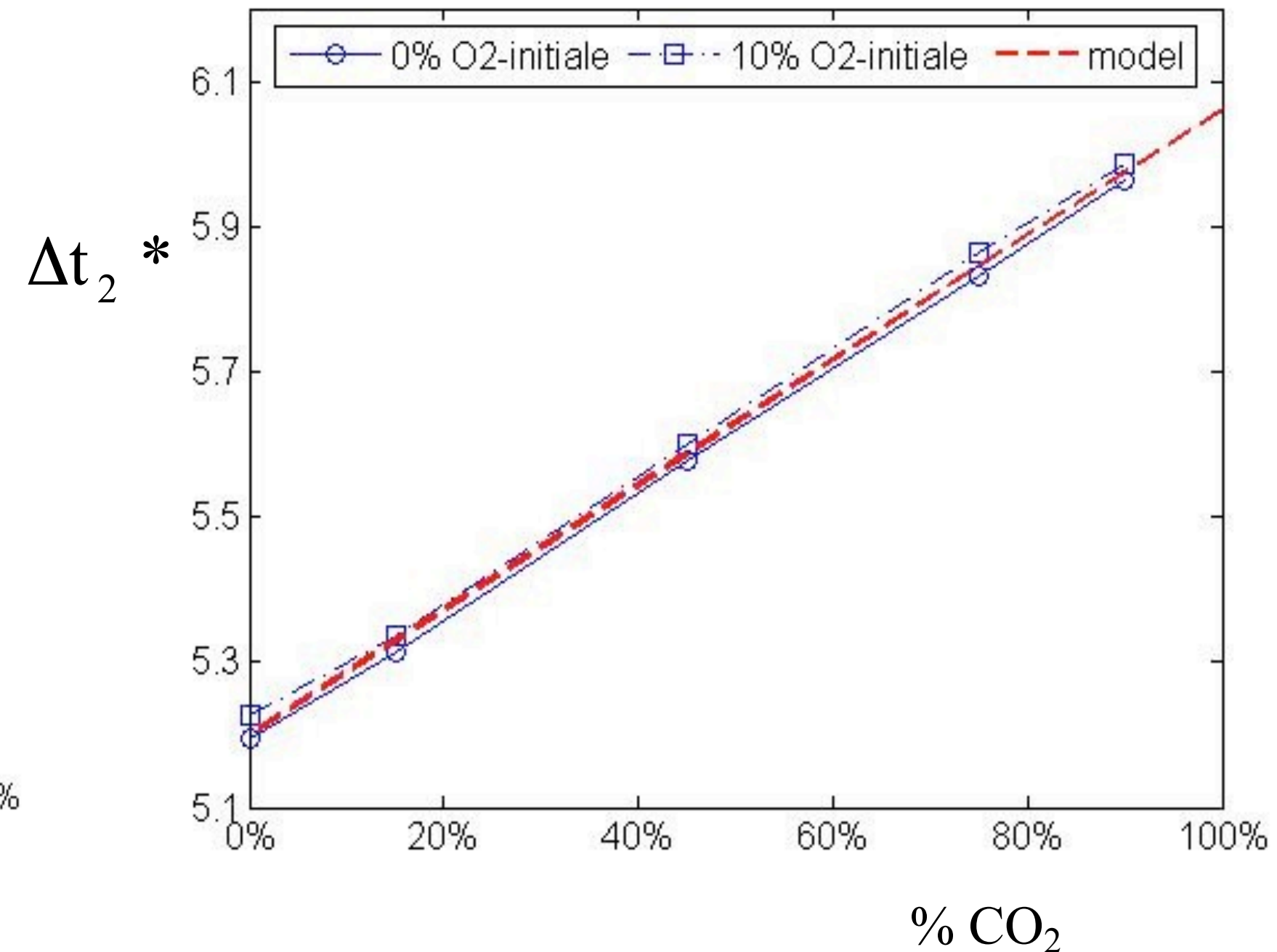
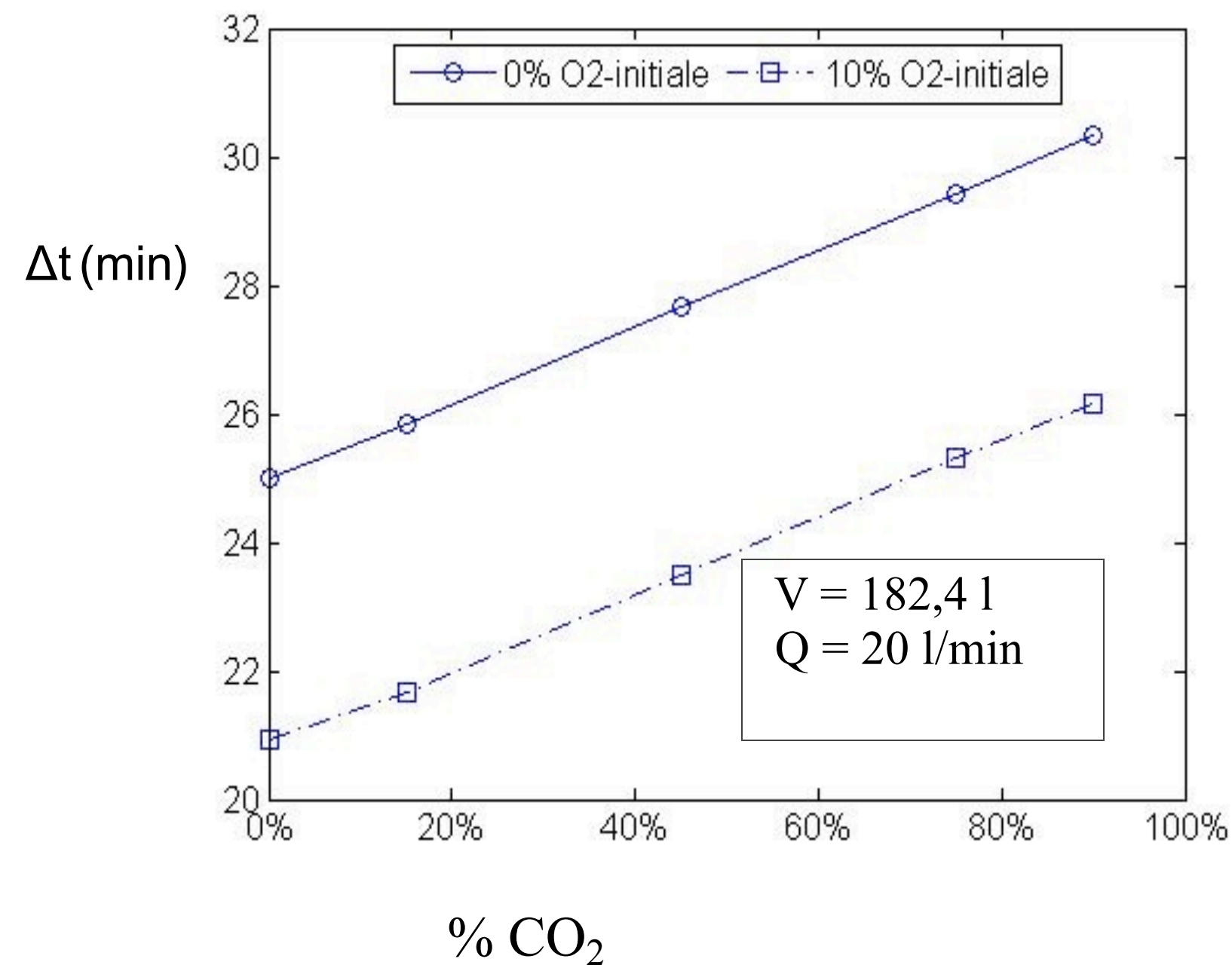


$$\ddot{A}t_1 = \frac{\delta D^2 H}{4Q} [1,02 \ln(21\% - C_iO_2) + 5,5933]$$

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

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Étude paramétrique (suite)



$$\Delta t_2^* = \frac{\ddot{A}t \times 4 \times Q}{\delta \times D^2 \times H} - \ln(21\% - C_i O_2)$$

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

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Modèle analytique

$$\Delta t = \frac{\delta D^2 H}{4 Q} \left[\ln(21\% - C_i O_2) + 0,86 C_i CO_2 + 5,2 \right]$$

Validation du modèle

Δt :	temps de ventilation, [min].				
D :	diamètre du silo-tour, [m].	m ³ /min	Exp.	Num.	Modèle
H :	hauteur du silo-tour, [m]				
Q :	débit de l'air de soufflage, [m ³ /min]				
$C_i CO_2$	: concentration CO ₂ initiale, [%]	10	54 min	56 min	58 min
$C_i O_2$	: concentration O ₂ initiale, [%]	20	26 min	28 min	29 min
		40	13 min	14 min	16 min

$C_i O_2 = 0 \%$ et $C_i CO_2 = 100\%$

$\Delta t = 4 \frac{\text{Volume à ventiler}}{\text{Débit de ventilation}}$

$H = 6,45 \text{ m}, D = 6 \text{ m}, C_i O_2 = 10\%$
et $C_i CO_2 = 25\%$

1/taux de changement
d'air par heure

CONCLUSIONS

- Étude terrain met en évidence le danger des silos

1 situation étudiée pour 1 saison

- Silo à échelle réduite conçu au laboratoire de l'IRSST
- Validation des simulations numériques
- Modèle analytique simple validée
- Forme de la surface d'ensilage, conduit de ventilation,
position du soufflage et de l'évacuation et taux d'émission
- Instruments de détection des gaz

Perspectives : Prendre en considération la chute