



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 206356 - 2723467 - v1.0

28/07/2022

Principes de ventilation en zone ATEX

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : Direction Incendie, Dispersion, Explosion

Rédaction : SALIQUE Florian - DURAND CAMILLE

Vérification : DURIF MARC; BOUET REMY; STOUVENEL MICKAEL; DEBRAY BRUNO; EVANNO SEBASTIEN; LEPRETTE EMMANUEL; GENTILHOMME OLIVIER

Approbation : Document approuvé le 28/07/2022 par ROUIL LAURENCE

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

Table des matières

1	Introduction.....	5
2	Ventilation générale.....	6
2.1	Ventilation naturelle.....	6
2.1.1	NF EN 60079-10-1 : 2019.....	6
2.1.2	ARENE.....	10
2.1.3	Formule d'un flux.....	10
2.1.4	NF EN 62485-3 : 2015.....	11
2.1.5	Conclusion.....	11
2.2	Ventilation mécanique.....	11
3	Aspirations locales.....	14
3.1	Principes généraux.....	14
3.2	Exemple d'aspirations localisées.....	15
3.2.1	Bras d'aspiration.....	15
3.2.2	Table aspirante.....	15
3.2.3	Sorbonnes de laboratoire.....	16
3.2.4	Captation annulaire.....	17
3.2.5	Cabines d'application par pulvérisation de produits liquides (peintures, vernis).....	17
3.2.6	Cabines d'application par projection de peintures en poudre.....	19
4	Efficacité, disponibilité de la ventilation et classement de zone.....	20
4.1	Définition de l'efficacité et de la disponibilité de ventilation de la norme EN 60079-10-1.....	20
4.2	Cas de la ventilation naturelle.....	21
4.3	Cas de la ventilation mécanique.....	22
5	Conclusion.....	23

Table des illustrations

Figure 1.	Bras d'aspiration.....	15
Figure 2.	Schéma d'une table aspirante.....	15
Figure 3.	Schéma général d'une Sorbonne.....	16
Figure 4.	Anneau de Pouyès.....	17
Figure 5.	Résumé des technologies de cabines par pulvérisation de produit liquide inflammable.....	18
Figure 6.	Résumé des technologies de cabines d'application de peinture en poudre.....	19

Tableau 1. Coefficients adimensionnels de pression de vent proposés dans la norme NF EN 15242¹..7

Tableau 2. Paramètres de la couche limite atmosphérique².....8

Tableau 3. Paramètres caractéristiques d'un profil du vent de type « logarithmique ».....8

Tableau 4. Zones correspondant au degré de dégagement et efficacité de la ventilation.....21

Résumé

Le présent document a pour but de définir un état de l'art des définitions, recommandations d'installation et de sécurisation ainsi que des modèles de calculs de débit de ventilation naturelle ou mécanique.

Il répertorie les dispositifs de ventilation localisée et leurs caractéristiques. Enfin, il définit les concepts d'efficacité et de disponibilité d'une ventilation vis-à-vis de la réglementation ATEX, et plus particulièrement, de la norme IEC 60079-10-1 : 2020.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Principes de ventilation en zone ATEX, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 206356 - v1.028/07/2022.

1 Introduction

Dans le cas des fuites prévisibles, pouvant générer des ATEX, étudiées dans ce rapport, le gaz ou la vapeur qui se dégage dans l'atmosphère peut se diluer par mélange turbulent avec l'air et, dans une moindre mesure, par diffusion en fonction des gradients de concentration, tant que le gaz ne s'est pas totalement dispersé et que la concentration n'est pas nulle. Le mouvement d'air dû à la ventilation naturelle ou artificielle favorise cette dispersion.

Des taux de ventilation appropriés peuvent réduire la durée de persistance d'une atmosphère explosive gazeuse et ainsi affecter le type de zone.

La dispersion ou la diffusion de gaz ou de vapeur dans l'atmosphère est un facteur essentiel de réduction de la concentration de gaz ou de vapeur sous la limite inférieure d'inflammabilité.

La ventilation et le mouvement d'air ont deux fonctions de base :

- a) Augmenter le taux de dilution et favoriser la dispersion afin de limiter l'étendue d'une zone ;
- b) Éviter la persistance d'une atmosphère explosive qui peut influencer le type d'une zone.

Une ventilation générale d'un local aura pour but principal d'assurer la deuxième fonction, à savoir d'empêcher l'accumulation de gaz ou vapeur à l'intérieur de l'espace clos sans pour autant limiter ou empêcher une ATEX locale de se former : alors qu'une aspiration locale permet d'assurer la première fonction en limitant voire empêchant la formation d'une ATEX.

Cependant, l'aspiration locale, pour être efficace doit être bien positionnée et le type de captage adapté à la fuite, d'où l'importance d'étudier les possibilités d'émissions des installations en amont.

2 Ventilation générale

2.1 Ventilation naturelle

D'après les articles R. 4222-3 et R. 4222-4 du Code du travail, la ventilation est dite naturelle et permanente lorsque les locaux comprennent des ouvrants qui donnent directement sur l'extérieur. Ces ouvrants peuvent, par exemple, être des portes ou des fenêtres. La ventilation naturelle sera assurée par le vent ou par l'écart de température entre l'extérieur et l'intérieur.

Le Code du travail impose que les dispositifs de commande de ces ouvrants (les poignées de portes ou de fenêtres, par exemple) soient accessibles aux occupants des locaux.

2.1.1 NF EN 60079-10-1 : 2019

D'après la norme NF EN 60079-10-1 :2019, la ventilation naturelle des bâtiments est le résultat des différences de pression induites par le vent et/ou les gradients de température (ventilation induite par la flottabilité). La ventilation naturelle peut être efficace dans certaines situations à l'intérieur de bâtiments (quand les murs et/ou le toit d'un bâtiment sont pourvus d'ouvertures, par exemple) pour diluer les dégagements en toute sécurité.

Les taux de ventilation résultant de la ventilation naturelle sont par définition très variables.

D'après la norme NF EN 60079-10-1 :2019, la ventilation naturelle peut être calculée de deux manières en fonction du phénomène pris en compte.

Pour une ventilation induite par le vent

$$Q_a = C_d A_e u_w \sqrt{\Delta C_p}$$

Avec :

Q (m³/s) : débit d'air dans le local

C_d (sans dimensions) : Coefficient de débit grand orifice de ventilation (entre 0,5 et 0,75 en général)

A_e (m²) : Surface utile des ouvertures de ventilation naturelle

u_w (m/s) : Vitesse du vent au niveau des ouvertures

ΔC_p (sans dimensions) : Coefficient de pression du bâtiment

Des valeurs de C_p sont déterminées dans la norme N

F EN 15242¹ pour certaines configurations et répertoriées dans le Tableau 1.

De plus, la vitesse de vent au niveau d'une ouverture u_w peut être déterminée par plusieurs formules dont les deux plus simples d'application sont les suivantes :

- La relation proposée par ASHRAE²

$$v_{bat} = v_{met} \left(\frac{\delta_{met}}{H_{met}} \right)^{a_{met}} \cdot \left(\frac{H_{bat}}{\delta_{bat}} \right)^{a_{bat}}$$

¹ EN 15242. 2007. Méthodes de calcul pour la détermination des débits d'air dans les bâtiments y compris l'infiltration. Ventilation des bâtiments. Août 2007

² ASHRAE. 2001. "ASHRAE Handbook: Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers", Inc., Atlanta.

où :

v est la vitesse du vent (m/s),

H est la hauteur à laquelle la vitesse du vent est évaluée (m),

δ est l'épaisseur de la couche limite due au vent (m),

a est un exposant déduit du type de terrain (-),

met est un indice relatif à la station météorologique,

bat est un indice relatif au bâtiment.

Les paramètres **a** et **δ** sont déterminés à l'aide du Tableau 2.

- Une loi de type « logarithmique » :

$$v_{bat} = v_{met} a \ln\left(\frac{H_{bat}}{z_0}\right)$$

où **a** et **z0** représentent un coefficient et une rugosité spécifiques à la nature du terrain (Tableau 3).

Dans ce cas, la vitesse **v_{met}** représente la vitesse à 10 m sur un site ouvert (station météo).

Partie de façade	Protection	Coefficients adimensionnels de pression de vent				
		Au vent C_{p1}	Sous le vent C_{p2}	Toit (suivant la pente) C_{p3}		
				< 10°	10° – 30°	> 30°
Basse	Ouverte	+ 0,50	- 0,70	- 0,70	- 0,60	- 0,20
	Normale	+ 0,25	- 0,50	- 0,60	- 0,50	- 0,20
	Protégée	+ 0,05	- 0,30	- 0,50	- 0,40	- 0,20
Moyenne	Ouverte	+ 0,65	- 0,70	- 0,70	- 0,60	- 0,20
	Normale	+ 0,45	- 0,50	- 0,60	- 0,50	- 0,20
	Protégée	+ 0,25	- 0,30	- 0,50	- 0,40	- 0,20
Haute	Ouverte	+ 0,80	- 0,70	- 0,70	- 0,60	- 0,20

Tableau 1. Coefficients adimensionnels de pression de vent proposés dans la norme NF EN 15242¹

Catégorie de terrain	Description	Exposant a (-)	Epaisseur de couche limite δ (m)
1	Centres de grandes villes, dans lesquels au moins 50% des bâtiments ont une hauteur > 21 m soit sur plus de 2 km soit sur plus de 10 fois la hauteur du bâtiment en amont	0.33	460
2	Aires urbaines et périurbaines, espaces boisés, ou autres terrains avec de nombreuses obstructions resserrées ayant la taille de maisons individuelles ou plus, soit sur plus de 2 km soit sur plus de 10 fois la hauteur du bâtiment en amont	0.22	370
3	Terrain ouvert avec des obstructions dispersées dont la hauteur est généralement inférieure à 10 m, comprenant les terrains ouverts typiques des alentours des stations météorologiques	0.14	270
4	Terrains plats sans obstruction exposés à un vent s'écoulant sur une distance d'au moins 1.6 km sur l'eau, et sur une distance soit de 500 m soit de 10 fois la hauteur du bâtiment sur terre	0.10	210

Tableau 2. Paramètres de la couche limite atmosphérique²

Catégorie de terrain	Description	Coefficient a (-)	Rugosité z_0 (m)
1	Zones urbaines, bois et forêts	0.266	1.000
2	Bocage dense, petits bois, banlieue pavillonnaire	0.240	0.400
3	Campagne avec cultures élevées (maïs, vigne, petits arbres fruitiers), bocage, habitat dispersé	0.229	0.250
4	Rase campagne plate ou légèrement ondulée avec des obstacles épars (maisons, arbres, haies) Cultures basses	0.202	0.070
5	Prairies plates à herbes rases sans arbres ni construction	0.182	0.020
6	Grande étendue d'eau (océan, mer, lac)	0.166	0.005

Tableau 3. Paramètres caractéristiques d'un profil du vent de type « logarithmique »³

Pour une ventilation induite par la flottabilité de l'air

La formule, ci-dessous, prend compte uniquement les effets de la flottabilité de l'air induits par une différence de température et non pas induits par une différence de masse volumique entre l'air et une autre substance.

$$Q_a = C_d A_e \sqrt{\frac{4 \Delta T}{(T_{in} + T_{out})} g H}$$

Avec :

Q (m³/s) : débit d'air dans le local,

C_d (sans dimensions) : Coefficient de débit grand orifice de ventilation (entre 0,5 et 0,75 en général),

A_e (m²) : Surface utile des ouvertures de ventilation naturelle,

T_{in} ; T_{out} ; ΔT (K) : Respectivement la température à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment et la différence entre les deux.,

H (m) : distance verticale entre les points médians des ouvertures de ventilation naturelle,

g : constante gravitationnelle = 9.81 m/s² .

³ AICVF. 1985. Aéraulique. « Principes de l'aéraulique appliqués au génie climatique. Collection des guides de l'AICVF ». PYC édition, Ivry-sur-Seine, France.

Les deux formules utilisent la valeur A_e et la valeur C_d . La valeur A_e , surface utile des ouvertures de ventilation naturelle, est calculable via la formule suivante :

$$A_e = \sqrt{\frac{A_1^2 A_2^2}{A_1^2 + A_2^2}}$$

Avec A_1 et A_2 les surfaces utiles des ouvertures de ventilation naturelle (en m^2).

Combinaison des deux phénomènes

La ventilation induite par le vent et la ventilation induite par la flottabilité peuvent se produire séparément, mais elles sont aussi susceptibles de se produire en même temps. Leurs forces peuvent s'opposer ou se compléter, selon la position des orifices d'entrée et de sortie.

Les flux de ventilation générés par les différences de pression et les différences de température peuvent également être estimés par des calculs complexes. La norme permet l'estimation simple du flux combinaison des deux phénomènes :

$$Q_a = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_a}} \quad (m^3/s)$$

Avec :

Q (m^3/s) : débit d'air dans le local,

C_d (sans dimensions) : Coefficient de débit grand orifice de ventilation (entre 0,5 et 0,75 en général),

A (m^2) : Surface utile des ouvertures de ventilation naturelle,

ρ_a (kg/m^3) : Densité de l'air à T,

Δp (Pa) : Différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du local qui peut être estimé de la manière suivante :

$$\Delta p = P_{int} - P_{atm} = P_{sta} + P_{dyn} - P_{atm} \text{ avec :}$$

- P_{atm} : la pression atmosphérique mesurable et dépendante de la température, l'humidité et l'altitude,
- P_{sta} : la pression statique du local mesurable et dépendante de la température, l'humidité et l'altitude,
- P_{dyn} : la pression dynamique égal à $0,5 \times P_{sta} \times v^2$ où v est la vitesse d'air aux intersection avec l'extérieur.

Valeur de C_d

La valeur C_d , valeur importante dans le calcul des formules présentées plus haut, réfère à la facilité des mouvements d'air à travers l'ouverture. Elle diminue avec les frictions aux parois et les turbulences générées par l'écoulement. La caractérisation de C_d est difficile. Dans l'idéal, il faudrait caractériser chaque orifice pour toujours obtenir une bonne approximation du débit. Cependant, il est possible de déduire d'expériences passées les tendances suivantes⁴ :

- C_d vaut en moyenne entre 0,6 et 0,65 pour des ouvertures de ventilation naturelle standard ;
- Plus l'ouverture est grande plus le coefficient est faible ;
- L'incidence du vent sur l'orifice joue un rôle : le coefficient diminue aux alentours de 0.55 pour des incidences entre 45 et 90 °
- Une ouverture carrée possède un coefficient plus élevé qu'une ouverture circulaire ;
- Pour de petites ouvertures (diamètre < 12 mm), un facteur profondeur / diamètre > 0.5 augmente le coefficient.

⁴ Jean-Rémy Salliou. Analyse de l'influence de paramètres géométriques et physiques sur le coefficient de décharge appliqué à la ventilation dans le bâtiment. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. 2011. ffdumas-00633711f

Ainsi, le fait de « canneler » une ouverture de ventilation naturelle permet d'en augmenter son coefficient de débit. Cependant, dans les deux formules, la valeur de C_d reste difficile à déterminer précisément et est laissée à l'appréciation de l'expert.

2.1.2 ARENE

D'après un guide⁵ rédigé par l'ARENE île de France et l'Institut pour la conception environnementale du bâti (ICEB), deux configurations d'ouvrant sont possibles pour une ventilation naturelle :

- Ouverture unique ;
- Double ouverture, idéalement une ouverture en partie haute et une ouverture en partie basse.

Le débit d'air généré par la ventilation naturelle induite par la flottabilité liée une différence de température de l'air peut alors être donné par les formules suivantes :

Ouverture simple	Double ouverture
$Q[\text{m}^3/\text{h}] = 260 \times A \times (0,5H \times \Delta T)^{1/2}$	$Q[\text{m}^3/\text{h}] = 520 \times A \times (H \times \Delta T)^{1/2}$

Avec :

- Q : débit de ventilation en m^3/h ;
- A : surface du plus petit ouvrant [m^2] ;
- H : différence de hauteur entre les deux ouvrants [m] ;
- ΔT : différence de température entre l'air de la pièce et l'air extérieur [$^{\circ}\text{C}$].

Il est à noter que la formule de l'ARENE, pour une double ouverture, donne des valeurs similaires à celles de la norme NF EN 60079-10-1 ($\pm 10\%$) pour des conditions atmosphériques de température (T_{in} et T_{out} de 0 à 30 $^{\circ}\text{C}$) et un coefficient C_d compris entre 0,52 et 0,59. Le débit calculé par la norme est supérieur si C_d est supérieur.

2.1.3 Formule d'un flux

Une autre méthode de calcul du débit de ventilation naturelle est d'utiliser l'échelle de Beaufort pour déterminer la vitesse du vent. Ainsi, on peut considérer les conditions les plus défavorables en termes de dilution des polluants :

- Nombre de Beaufort 0 : Calme : vitesse de vent < 0,3 m/s ;
- Nombre de Beaufort 1 : très légère brise : vitesse de vente de 0,3 à 1,5 m/s ;
- Nombre de Beaufort 2 : légère brise : vitesse de vent de 1,5 à 3,3 m/s ;
- Nombre de Beaufort 3 : petite brise : vitesse de vent de 3,3 à 5,5 m/s.

En multipliant cette vitesse v en m/s par la surface de l'ouvrant S en m^2 , on obtient le débit de ventilation en m^3/s selon la formule d'un flux : $Q = C_d \times v \times S$.

Cette formule assez simple, ne prend pas en considération les spécificités du local considéré mais peut être similaire à la norme dans le cas où le coefficient $C_d \approx \frac{1}{\sqrt{4C_p}}$.

⁵ Ventilation naturelle et mécanique, Les guides bio-tech, piloté par Dominique Sellier, ARENE île de France, ICEB, 2012.

2.1.4 NF EN 62485-3 : 2015

Enfin, la norme NF EN 62485-3 : 2015 « Exigences de sécurité pour les batteries d'accumulateurs et les installations de batteries - Partie 3 : batteries de traction » permet d'estimer les dimensions des ouvertures de ventilations naturelles minimales nécessaires pour un débit d'air frais exigé.

Ainsi, la norme NF EN 62485-3 : 2015 prend la problématique à contre sens des deux premières références. En effet, au lieu de déterminer le débit de ventilation d'un local à partir de la taille des ouvertures, la norme donne une indication sur la taille des ouvertures à prendre en compte pour un débit de fuite devant être déterminé par calcul ou simulation.

$$A = 28 \times Q$$

où

Q est le débit d'air frais exigé de la ventilation [m^3/h];

A est la zone libre d'ouverture d'entrée et de sortie d'air [cm^2].

Cette formule donne la même taille d'ouverture que la formule d'un flux pour une vitesse de vent de 0,13 m/s, et est majorante pour des vitesses supérieures et donc permet d'être conservatrice dans les recommandations d'ouvertures minimales de ventilations naturelles

2.1.5 Conclusion

Il existe ainsi plusieurs formules de calcul différentes pour déterminer le débit et/ou les ouvertures nécessaires pour une ventilation naturelle. Les plus précises nécessitant de connaître le plus de paramètres, il conviendra de choisir la formule en fonction des paramètres connus. Les diverses formules sont à comparer à des cas réels dans le but de déterminer les domaines d'applications ainsi que les avantages et inconvénients de chacune. Cette comparaison pourra être faite dans une prochaine étude.

Il est à noter qu'un logiciel nommé CONFINE et développé par le CETE de Lyon permet également la modélisation des déplacements d'air dans un milieu confiné⁶.

2.2 Ventilation mécanique

La ventilation générale opère par dilution des polluants à l'aide d'un apport d'air neuf dans le local de travail de manière à diminuer les concentrations des substances inflammables pour les amener à des valeurs aussi faibles que possible (maximum 25 % de la LIE dans les locaux et 10 % en cas de présence de personnel⁷). Elle permet de diminuer les concentrations, mais ne réduit pas la quantité totale de polluants libérés dans l'atelier. De par ce principe de dispersion des polluants, la ventilation générale admet un niveau de pollution résiduel des lieux de travail. Il est ainsi préférable de l'utiliser en complément de ventilations locales (cf. §3) pour assurer un apport minimum d'air neuf dans les locaux et diluer les polluants non captés par les systèmes d'aspiration localisée.

La conception d'une installation de ventilation mécanique générale reste, dans l'état de l'art actuel, une opération difficile qui fait appel à une large part d'empirisme bien que certains modèles existent pour faciliter la conception (modélisation CFD par exemple). Quelques principes généraux peuvent être énoncés :

⁶ « Modélisation des transferts aérauliques en situation de confinement : Bases théoriques et éléments de validation » CETE Lyon, Mars 2011

⁷ Circulaire du 09/05/85 relative au commentaire technique des décrets nos 84-1093 et 84-1094 du 7/12/1984 concernant l'aération et l'assainissement des lieux de travail

1. S'assurer qu'une ventilation locale des points d'émission est techniquement impossible. Une ventilation générale peut être utilisée comme technique principale pour l'aération de locaux à pollution non spécifique (i.e. pollution uniquement induite par la présence humaine, pas par des substances). Cependant, pour des locaux à pollution spécifique, on cherchera plutôt la mise en place de ventilations locales.
2. Compenser les sorties d'air par des entrées correspondantes prélevées dans des emplacements non pollués.
3. Positionner convenablement les ouvertures d'entrée et sortie d'air de façon à :
 - Tendre vers un écoulement général des zones propres vers les zones polluées ;
 - Essayer de faire passer le maximum d'air dans les zones polluées ;
 - Eviter les zones mortes ;
 - Eviter que les opérateurs ne soient entre les sources d'émission et l'extraction ;
 - Utiliser les mouvements naturels des polluants (densité, température des gaz).

La mise en application de ces recommandations est difficile. En effet, la ventilation générale procède par dilution du polluant en le dispersant dans l'atmosphère du local, il faut ainsi être prudent dans la prévision des mouvements d'air pollués dans les locaux munis de ventilation générale.

4. Rejeter l'air pollué en dehors des zones d'entrée d'air neuf et dans des zones exemptes de personnel et d'installations.

Le débit théorique d'air à mettre en place dans une installation de ventilation générale est calculable par la formule suivante⁸ :

$$Q = \frac{K D}{C - C_0}$$

Avec :

Q : Débit de ventilation générale (m³/s),

D : Débit d'émission de polluant, supposée régulière dans le temps (kg/s),

C : Concentration en polluant tolérée dans le local (kg/m³),

C₀ : Concentration en polluant dans l'air neuf (généralement 0 sauf en cas de réutilisation partielle de l'air pollué dans l'air neuf) (kg/m³),

K : (sans dimension) Facteur de sécurité variant de 3 à 10 en fonction de l'uniformité de la répartition du débit d'air, la position des ouvriers par rapport aux sources, le degré d'inflammabilité des polluants, la non-uniformité du débit des polluants...

Les principales difficultés pour l'application de cette formule sont la détermination du débit de polluants émis (D) et l'estimation du paramètre K.

A noter que le taux de renouvellement horaire R(h⁻¹) :

$$R = 3600 \frac{Q}{V}$$

Le taux horaire de renouvellement d'air dépend du volume V (en m³) du local. Il n'intervient donc pas dans le calcul de débit de ventilation générale mais en découle. L'utilisation d'une valeur de taux de renouvellement horaire dans le dimensionnement d'une ventilation est non justifiée et peut être dangereuse puisqu'elle conduit pour une même source de pollution à des débits de ventilation différents selon la taille du local et donc à des concentrations en polluant différentes.

⁸ ED 695 (2015) INRS. Principes généraux de ventilation.

Différents logiciels permettent de calculer les débits de ventilation mécanique dans certaines conditions. Ces modèles peuvent être classés en trois familles :

Les modèles simples nécessitant des formules de calculs mais également des hypothèses simple :

- Modèle de Cleaver :
- Modèle de Linden :

Les modèles à zones servant à des cas particuliers avec des hypothèses précises dont les logiciels suivants font partie :

- Mathis⁹ : Développé par le CSTB et permettant le calcul aéraulique de déplacements des gaz dans un bâtiment ainsi que la réalisation des calculs thermo-aérauliques par l'utilisation du module thermique interne à l'outil ;
- COMFIE¹⁰ : Développé par IZUBA énergie et permettant le calcul des débits d'air entre pièces, s'appuyant, lorsque c'est nécessaire, sur le calcul de la pression dans chaque pièce à chaque pas de temps ;
- Sylvia¹¹ : développé par l'IRSN et permettant de déterminer le comportement d'une ventilation en cas d'incendie dans une installation nucléaire ;
- DimVNH¹² : Développé à l'initiative de l'association AVEMS et permettant de dimensionner les réseaux de ventilation hybride.

Les modèles tridimensionnels ou CFD permettant des modélisations 3D mais nécessitant la disposition précise dans l'espace des différents éléments nécessaires au calcul et une forte puissance de calcul :

- Fluent :
- StarCd :
- OpenFoam :
- FDS utilisé à l'Ineris permettant la modélisation de dispersion de gaz ou vapeur à l'intérieur d'un local pour un débit et un emplacement d'entrée et de sortie d'air donné.

⁹ <https://gitlab.com/CSTB/mathis>

¹⁰ https://docs.izuba.fr/v4/fr/index.php/Calcul_A%C3%A9raulique?toc-id=318

¹¹ https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/outils-scientifiques/Codes-de-calcul/Documents/PSN_FICHE_Logiciels_de_calcul_SYLVIA_FR_ver031114.pdf

¹² <https://www.batiment-ventilation.fr/outils/logiciels>

3 Aspirations locales

3.1 Principes généraux

Les aspirations localisées maintiennent les substances dans un volume restreint et évacuent les polluants au lieu de les diluer. Ces dispositifs demandent des débits d'air beaucoup plus faibles que les installations de ventilation par dilution (i.e. Ventilations générales), d'où des gains sur les coûts d'investissement, de fonctionnement et de chauffage.

Les principes de la ventilation locale sont les suivants ⁸ :

1. Envelopper au maximum la zone d'émission de polluants de manière à contenir au maximum les polluants, diminuer la surface de la zone par laquelle ceux-ci peuvent s'échapper et réduire les effets nuisibles des courants d'air. Les capotages devront être conçus de manière à ne pas gêner les opérateurs. Ce principe permet d'augmenter l'efficacité de l'aspiration tout en diminuant les débits à mettre en jeu.
2. Capter au plus près de la zone d'émission car l'efficacité des dispositifs d'aspiration diminuent très rapidement avec la distance.
3. Placer le dispositif d'aspiration de manière à maintenir l'opérateur en dehors du flux d'aspiration. Le mouvement d'air propre doit toujours se faire dans le sens de l'opérateur vers la source de pollution puis vers le dispositif d'aspiration.
4. Utiliser les mouvements naturels des polluants. Dans le cas d'émissions d'air pollué chaud, les dispositifs de captage seront placés de manière à tenir compte de la force ascensionnelle des gaz chauds et du débit d'air induit. De même, pour des gaz à température ambiante, la position des dispositifs de captage devra prendre en compte la densité des gaz émis.
5. Induire une vitesse d'air suffisante pour s'opposer aux effets dispersifs des courants d'air et aux mouvements initiaux de l'air pollué. Les valeurs à mettre en jeu sont fonction, pour l'ATEX, du type d'application, du débit et des caractéristiques d'inflammabilité, d'explosivité et de densité des polluants, des courants d'air résiduels et des forces ascensionnelles des gaz chauds. Cet aspect pourra être détaillé dans une prochaine étude.
6. Répartir uniformément les vitesses d'air au niveau de la zone de captage. Les critères de ventilation sont généralement exprimés sous forme de valeurs minimales des vitesses moyennes d'aspiration au niveau de la zone de captage. Les vitesses d'aspirations doivent être réparties aussi uniformément que possible de manière à éviter des accumulations d'air pollué dans les zones à plus faible vitesse, généralement les zones mortes du dispositif (angles, ...)
7. Compenser les sorties d'air par des entrées équivalentes. Cette compensation permet d'éviter une différence de pression entre le local et l'extérieur et d'assurer l'efficacité des systèmes de ventilation des locaux mais également des installations et d'empêcher la diffusion de l'air pollué à l'intérieur d'autres locaux adjacents. Sur un dispositif de ventilation localisé, il est possible d'effectuer une compensation par apport d'air neuf directement sur le poste associé.
8. Rejeter l'air pollué en dehors des zones d'entrées d'air neuf et dans un lieu exempt de personnel et d'installations car l'air relâché peut générer une ATEX. Le rejet devra tenir compte de la force et de la direction du vent ainsi que des reliefs. La récupération de la chaleur de l'air rejeté est possible par échangeur thermique.

3.2 Exemple d'aspirations localisées

3.2.1 Bras d'aspiration



Figure 1. Bras d'aspiration

Un bras d'aspiration est un système d'aspiration localisé « mobile » pouvant être fixé sur une prise d'aspiration localisée et pouvant être déplacé dans une zone limitée par la taille de la canalisation flexible. Ce système est pratique pour des opérations de faible envergure pouvant avoir lieu à différents endroits d'une même zone. Cependant, il est nécessaire de placer correctement la bouche d'aspiration pour une utilisation efficace du système. Ce système est donc peu recommandé pour des opérations fortement émissives ou des composés à faible LIE.

3.2.2 Table aspirante

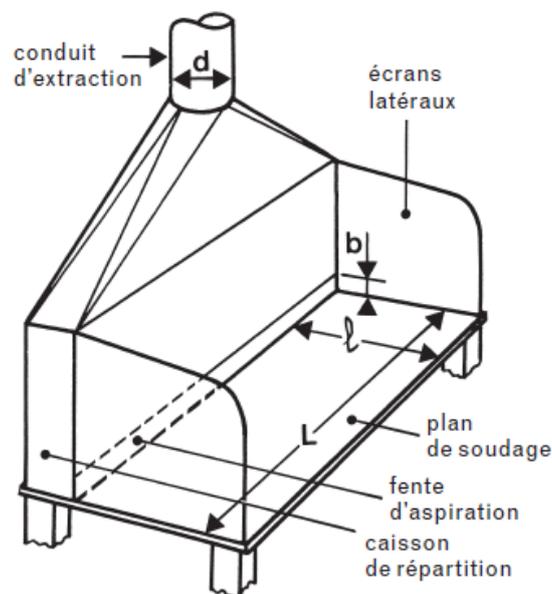


Figure 2. Schéma d'une table aspirante

La table aspirante est un système d'aspiration localisée constitué d'un plan de travail à travers lequel sont aspirés les polluants. L'air pollué passe ensuite derrière le plan de travail jusqu'au conduit d'extraction. En fonction des modèles, divers filtres peuvent être ajoutés sous le plan de travail pour purifier l'air. Certains modèles peuvent, également, relâcher l'air, dépollué par les filtres, dans l'atelier.

Ce système aspiration localisé peut être utilisé pour le traitement de diverses pièces mécaniques. Ce système est recommandé en cas d'émissions de fluides plus denses que l'air lors des opérations. Le facteur limitant des tables aspirantes reste sa taille, qui doit être plus grande que les pièces à traiter, ce qui n'est pas toujours possible.

3.2.3 Sorbonnes de laboratoire

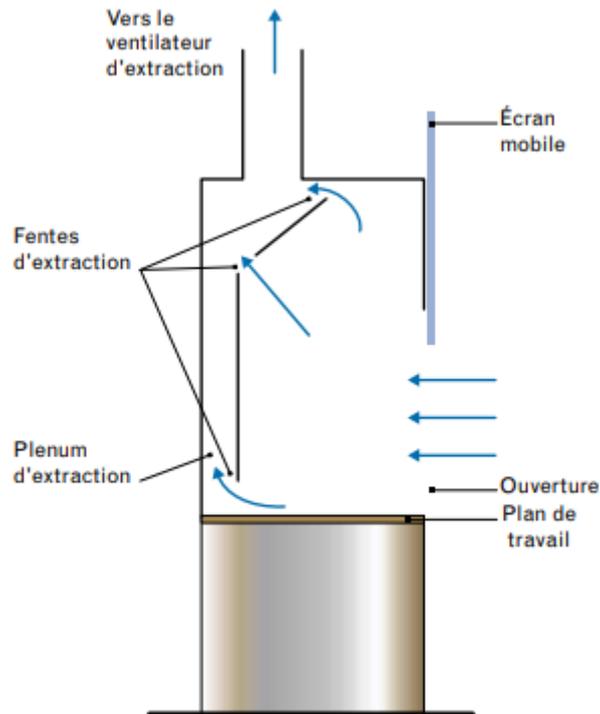


Figure 3. Schéma général d'une Sorbonne

Une sorbonne est un système d'aspiration locale composé d'un plan de travail surmonté par une hotte pouvant être fermée. Les polluants sont aspirés par le fond de la sorbonne, l'aspiration peut se faire au niveau de différentes fentes, selon les modèles (Cf. Figure). La sorbonne peut être utilisée pour les mêmes opérations que la table aspirante mais également pour la manipulation de gaz peu dense ou de vapeurs volatiles du fait de la présence de la hotte la surmontant.

Les sorbonnes sont des enceintes ventilées en dépression qui aspirent l'air dans le local et le rejettent dans l'atmosphère extérieure au moyen d'un ventilateur. Il s'agit d'équipements de protection collective destinés principalement à protéger les opérateurs des risques d'inhalation de produits chimiques dangereux. Ce sont des dispositifs de captage enveloppants dont l'usage est très répandu.

Il existe deux types de sorbonnes :

- Sorbonnes à débit variable ;
- Sorbonnes à débit auxiliaire.

Les sorbonnes à débit variable est fonction de la surface de l'ouverture. Cela permet de limiter la vitesse frontale lorsque cette ouverture est réduite. La réduction du débit aspiré ne doit cependant pas se traduire, par défaut de dilution dans la sorbonne, par un accroissement de concentration des produits susceptibles d'être dégagés tels qu'il y ait dépassement des 25 % de la LIE à l'intérieur de la sorbonne.

Les sorbonnes à débit auxiliaire sont alimentées avec de l'air pris directement à l'extérieur. Un problème se pose avec cette configuration : la réduction excessive du débit aspiré dans le local de travail lorsque la ventilation générale du local est assurée uniquement par le fonctionnement des sorbonnes.

3.2.4 Captation annulaire

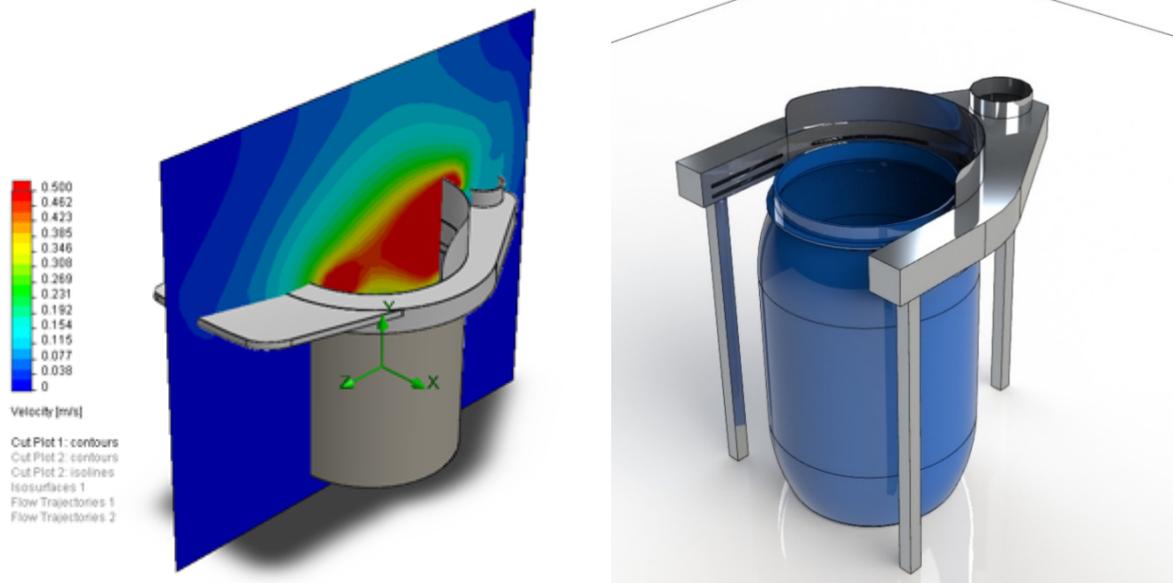


Figure 4. Anneau de Pouyès

Les systèmes de captation annulaire sont des systèmes d'aspirations localisées à mettre sur des fûts de produits inflammables avant leur ouverture. Ils ont généralement la forme de cercles ou de demi-cercles permettant une aspiration en leur centre au niveau de l'ouverture du fût. L'anneau de Pouyès est un exemple de système de captation annulaire.

3.2.5 Cabines d'application par pulvérisation de produits liquides (peintures, vernis)

Les peintures et vernis habituellement utilisés dans l'industrie ou la carrosserie automobile peuvent présenter des risques d'intoxication, d'incendie et d'explosion.

Afin de maîtriser ces risques, l'utilisation de cabines d'application est préconisée. Différents types de cabines¹³ existent :

- Cabines à ventilation verticale :
 - Cabines fermées ;
 - Cabines ouvertes ;
- Cabines à ventilation horizontale :
 - Cabines ouvertes ;
 - Cabines fermées.

Ces cabines sont équipées d'un système de ventilation par aspiration locale à la source. Elles permettent de diluer efficacement des vapeurs de produits liquides telles que des peintures ou autres solvants.

¹³ NF EN 12215+A1 : 2010

Le tableau 5, ci-dessous, résume les différentes technologies susmentionnées.

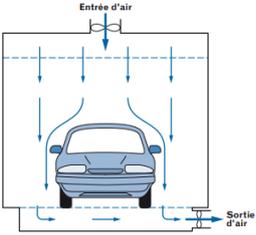
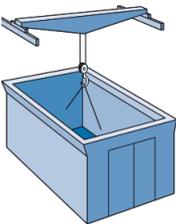
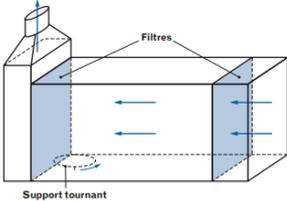
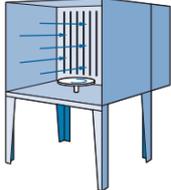
	Cabines à ventilation verticale		Cabines à ventilation horizontale	
	Cabines fermées	Cabines ouvertes	Cabines fermées	Cabines ouvertes
Vitesse de l'air (m/s)	$0,3 - 0,4 < v < 5$ Une vitesse supérieure à 5 m/s entraîne des turbulences et une hétérogénéité du flux d'air.	$0,3 - 0,4 < v < 5$ Une vitesse supérieure à 5 m/s entraîne des turbulences et une hétérogénéité du flux d'air.	$0,4 < v$	$0,4 < v$
Localisation des bouches de ventilation	Sol et plafond	Sol	Murs	Surface opposée à l'application
Schéma				
Remarques	A utiliser par défaut	A utiliser uniquement si la cabine fermée n'est pas utilisable (objets volumineux)	Dans les cas où l'on ne peut recourir techniquement à la ventilation verticale, une cabine fermée à ventilation horizontale peut être envisagée	Utilisées pour des pièces de petites ou moyennes dimensions

Figure 5. Résumé des technologies de cabines par pulvérisation de produit liquide inflammable

3.2.6 Cabines d'application par projection de peintures en poudre

Cette technologie est très proche des cabines d'application par pulvérisation de produits liquides. De telles cabines permettent de palier les risques d'incendie et d'explosion sur le lieu d'application par aspiration locale à la source.

Les différentes technologies de cabines¹⁴ sont :

- Cabine fermée à ventilation verticale ;
- Cabine fermée à ventilation horizontale ;
- Cabine tunnel (ouverte) à ventilation verticale (opérateur à l'extérieur ou à l'intérieur) ;
- Cabine ouverte à ventilation horizontale (opérateur à l'extérieur ou à l'intérieur).

L'application de la poudre est effectuée dans une cabine qui est un dispositif de captage enveloppant. L'utilisation de la cabine de poudrage est utilisée à la fois pour minimiser l'exposition des opérateurs et pour éviter la dispersion des poudres dans le reste de l'atelier. La cabine permet de restreindre la taille du local

Pour que la ventilation fonctionne effectivement, il est indispensable qu'un débit d'air neuf soit apporté en compensation de l'air extrait des cabines, mais aussi de celui extrait par d'autres dispositifs (aspirations localisées, fours, ...).

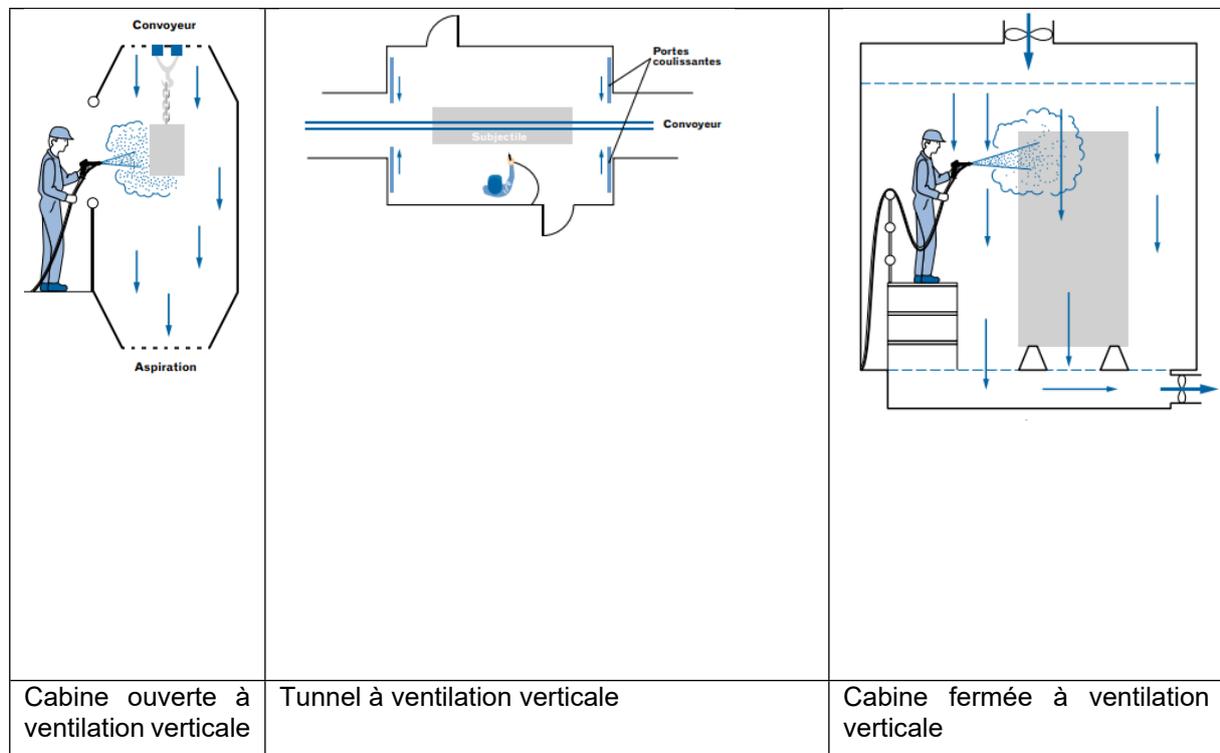


Figure 6. Résumé des technologies de cabines d'application de peinture en poudre

¹⁴ UNI EN 12981:2009

4 Efficacité, disponibilité de la ventilation et classement de zone

4.1 Définition de l'efficacité et de la disponibilité de ventilation de la norme EN 60079-10-1

L'efficacité de la ventilation à maîtriser la dispersion et la persistance de l'atmosphère explosive dépend du degré de dilution, de la disponibilité de la ventilation et de la conception du système. Par exemple, la ventilation peut ne pas être suffisante pour prévenir la formation d'une atmosphère explosive, mais peut être suffisante pour empêcher sa persistance.

Le degré de dilution est une mesure de l'aptitude des conditions de ventilation ou des conditions atmosphériques à assurer la dilution d'un dégagement à un niveau sûr. Par conséquent, un dégagement plus important correspond à un degré de dilution plus faible pour un ensemble donné de conditions de ventilation ou de conditions atmosphériques, un taux de ventilation plus faible correspondant à un degré de dilution moins élevé pour une quantité de dégagement donnée.

La disponibilité de la ventilation a une influence sur la présence ou non de la formation d'une atmosphère explosive gazeuse. De ce fait, il est nécessaire de prendre en considération la disponibilité de la ventilation (aussi bien que le degré de dilution) lors de la détermination du type de zone.

Il convient de prendre en considération trois niveaux de disponibilité de la ventilation :

- **bonne**: la ventilation existe pratiquement en permanence ;
- **assez bonne**: la ventilation est censée être présente pendant le fonctionnement normal. Des interruptions sont permises, pourvu qu'elles se produisent de façon peu fréquente et pendant de courte période ;
- **médiocre**: la ventilation ne satisfait pas aux normes de bonne ou d'assez bonne ventilation ; toutefois, des interruptions prolongées ne sont pas prévues.

Une ventilation dont la disponibilité ne satisfait même pas à l'exigence "médiocre" ne doit pas être considérée comme contribuant à la ventilation de l'emplacement, c'est-à-dire qu'une dilution faible s'applique.

L'efficacité et la disponibilité de la ventilation sont, au même titre que le degré de dégagement, des critères à prendre en compte dans les classements en zones ATEX.

Degré de dégagement	Efficacité de la ventilation						
	Dilution élevée			Dilution moyenne			Dilution faible
	Disponibilité de la ventilation						
	Bonne	Assez bonne	Médiocre	Bonne	Assez bonne	Médiocre	Bonne, assez bonne ou médiocre
Continu	Non dangereuse (Zone 0 EN) ^a	Zone 2 (Zone 0 EN) ^a	Zone 1 (Zone 0 EN) ^a	Zone 0	Zone 0 + Zone 2	Zone 0 + Zone 1	Zone 0
Primaire	Non dangereuse (Zone 1 EN) ^a	Zone 2 (Zone 1 EN) ^a	Zone 2 (Zone 1 EN) ^a	Zone 1	Zone 1 + Zone 2	Zone 1 + Zone 2	Zone 1 ou zone 0 ^c
Secondaire ^b	Non dangereuse (Zone 2 EN) ^a	Non dangereuse (Zone 2 EN) ^a	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 1 et même Zone 0 ^c
^a Zone 0 EN, Zone 1 EN ou Zone 2 EN indique une zone théorique dont l'étendue est négligeable dans les conditions normales. ^b L'emplacement en Zone 2 créé par un degré « dégagement secondaire » peut dépasser celui correspondant à un degré « dégagement primaire » ou à un degré « dégagement continu », auquel cas, il convient de prendre la plus grande distance. ^c correspond à la Zone 0 si la ventilation est très faible et le dégagement tel qu'en pratique une atmosphère explosive gazeuse est présente de façon pratiquement permanente (c'est-à-dire que la situation est proche d'une situation d'absence de ventilation). Le signe "+" signifie "entouré par". La disponibilité de la ventilation dans des espaces clos à ventilation naturelle ne doit jamais être considérée comme étant bonne.							

Tableau 4. Zones correspondant au degré de dégagement et efficacité de la ventilation¹⁵

4.2 Cas de la ventilation naturelle

Une structure dotée d'un nombre suffisant d'ouvertures pour assurer le libre passage de l'air dans toutes les parties du bâtiment est considérée, dans le cas des fuites générant des ATEX prévisibles, comme étant bien ventilée, et il convient de la traiter comme un emplacement à l'air libre (un abri avec les côtés ouverts et des prises d'air de ventilation sur le toit, par exemple).

Cependant, lorsque la dilution des dégagements d'un espace clos est assurée par la ventilation naturelle, le scénario le plus défavorable doit de préférence être pris en compte pour déterminer le taux de ventilation. Ce type de scénario donne donc lieu à un niveau plus élevé de disponibilité, ce qui compense les hypothèses trop optimistes formulées lors de l'estimation du taux de ventilation. Par exemple, dans certaines conditions ambiantes défavorables (les jours de vent, lorsque le vent souffle sur le côté ventilé de l'enveloppe, par exemple), le mouvement d'air extérieur peut empêcher le fonctionnement du mécanisme de flottabilité thermique. Dans ces circonstances, le niveau de ventilation et la disponibilité sont tous deux faibles, ce qui donne lieu à une classification plus rigoureuse.

En règle générale, dans un espace clos, avec la ventilation naturelle, un degré plus faible de ventilation se traduit par un niveau plus élevé de disponibilité, et inversement, ce qui compense les hypothèses trop optimistes formulées lors de l'estimation du degré de ventilation.

¹⁵ Norme NF EN 60079-10-1 : 2019 « Atmosphères explosives - Partie 10-1 : classement des emplacements - Atmosphères explosives gazeuses »

De plus, certaines situations exigent une attention particulière. Cela est particulièrement le cas lorsque les prises d'air de ventilation sont localisées principalement sur un seul côté de l'enceinte. Dans certaines conditions ambiantes défavorables (les jours de vent, lorsque le vent souffle sur le côté ventilé de l'enceinte, par exemple), le mouvement d'air extérieur peut empêcher le fonctionnement du mécanisme de flottabilité thermique. Dans ces circonstances, le degré de dilution et la disponibilité sont tous deux faibles, donnant lieu à un classement de zones plus rigoureux.

Enfin, en plein air, le degré de dilution est en général considéré comme moyen alors que la disponibilité de la ventilation (présence de vent) peut être considérée comme bonne, sauf en cas de ventilation restreinte (dans des puits, des digues ou des emplacements entourés par des structures élevées, par exemple).

4.3 Cas de la ventilation mécanique

La ventilation mécanique générale ou locale nécessite un dimensionnement adéquat vis à vis des fuites considérées. Si une ventilation locale est dimensionnée pour permettre une dilution de la fuite, telle qu'indiquée dans l'abaque C1 de la norme 60079-10-1, son efficacité peut être considérée comme élevée. De plus, la disponibilité d'une ventilation locale correctement positionnée peut être considérée, sous réserve qu'elle soit active et fonctionnelle, a minima comme assez bonne. Un système de sécurité supplémentaire en cas de défaillance de la ventilation permet de fiabiliser le système de ventilation et de considérer sa disponibilité comme bonne. Un système de détection de débit relié à une alarme en cas de perte d'efficacité de la ventilation et un protocole permettant de stopper la source d'émission et de réparer la ventilation est donc recommandé.

Une ventilation mécanique générale d'un local peut entraîner une dilution faible, moyenne ou bonne dépendant de l'agencement du local et de la position des bouches d'aération. Par exemple, la dilution sera faible dans le cas d'un déversement de liquide inflammable dans une zone fortement enclavée, moyenne en cas de présence d'installations entre la bouche de ventilation et la zone de déversement et bonne en cas de déversement dans une zone dégagée. Les limites entre les différentes dilutions sont détaillées dans la norme NF EN 60079-10-1 :2021. Dans certains cas, la modélisation CFD permet d'aider à la décision en visualisant les zones plus ou moins desservies par la ventilation. Ces outils sont assez peu utilisés lors des études ATEX car coûteux en temps et ressources mais peuvent permettre d'aider au choix des dispositions des bouches d'aération lors de la conception de la ventilation d'un local. De plus, comme la ventilation locale, la disponibilité d'une ventilation générale peut être considérée a minima comme assez bonne. Également, une sécurisation supplémentaire en cas de défaillance de la ventilation permet de fiabiliser le système de ventilation et de considérer sa disponibilité comme bonne.

Les systèmes de sécurité supplémentaires, permettant la fiabilisation des ventilations, proposés par l'Ineris sont :

- La mise en place de mesures de débit d'aspiration reliés à une ventilation de secours en cas de perte de vitesse ou d'arrêt de la ventilation ;
- La mise en place de mesures de débit d'aspiration reliés à une alarme en cas de perte de vitesse ou d'arrêt de la ventilation. Cette alarme doit déclencher l'arrêt des opérations effectuées dans le local ou sur l'installation concernée par l'aspiration locale, une mise en sécurité du personnel et une maintenance de la ventilation avant redémarrage.

Une ventilation mécanique peut être soutenue par une ventilation naturelle, cependant, cette dernière ne peut être considérée comme un système de sécurité fiable. Une analyse plus poussée des barrières de sécurité ainsi que de leurs possibles défaillances pouvant être mises en place sur une ventilation mécanique, notamment via une Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets, et de leur Criticité (AMDEC) pourra être envisagée dans une prochaine étude.

5 Conclusion

La présente étude a permis de définir les concepts d'efficacité et de disponibilité de ventilation, tels qu'identifiés dans la norme NF EN 60079-10-1 : 2019 ainsi que d'identifier les différentes méthodes de calculs et les recommandations d'installation associées aux ventilations naturelles et mécaniques qu'elles soient générales ou locales.

Cette étude n'étant qu'une étude préliminaire servant à l'élaboration d'un état de l'art concernant les méthodes de calculs et bonnes pratiques de mises en place de ventilation, les méthodes de calculs extraites dans ce document n'ont pas été confrontées à des cas réels ni comparées entre elles. Ces comparaisons pourront être faites dans une prochaine étude.

De plus, les recommandations concernant l'installation de barrières de sécurité sur les ventilations mécaniques n'ont pas fait l'objet d'une Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets, et de leur Criticité (AMDEC). Cette analyse pourra faire l'objet d'une prochaine étude.

