

RAPPORT DEFINITIF
DRA-17-169753-11711A

20/12/2017

Programme additionnel :

**Etude de sécurité sur le remplacement des
fluides frigorigènes**

Ministère de l'Intérieur

INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable |*

Programme additionnel :

Etude de sécurité sur le remplacement des fluides frigorigènes

Ministère de l'Intérieur

Direction des Risques Accidentels

PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

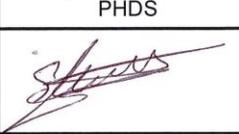
	Rédaction	Vérification		Approbation
Nom	Albin TARRISSE Olivier GENTILHOMME	Valérie DE DIANOUS Benjamin TRUCHOT	Frédéric MERLIER	Stéphane DUPLANTIER
Qualité	Ingénieurs des unités QRIB et DIEM	Responsables des unités QRIB et DIEM	Délégué Appui aux pouvoirs publics	Responsable du pôle PHDS
Visa				

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	7
1.1 Contexte de l'étude	7
1.2 Eléments contractuels.....	7
1.3 Objectif de l'étude	7
2. DESCRIPTION DU CHAMP D'ETUDE.....	9
2.1 Schémas d'implantation possibles	9
2.2 Exemples d'équipements visés par l'étude	10
2.3 Classification des fluides frigorigènes	12
3. IDENTIFICATION DES SCENARIOS A CONSIDERER POUR L'APPROCHE ADOPTEE PAR L'INERIS	15
3.1 Enseignements liés à l'accidentologie.....	15
3.2 Réflexion sur le niveau d'acceptabilité des risques	15
3.3 Identification des scénarios à considérer	16
4. SYNTHÈSE SUR LA PHÉNOMÉNOLOGIE DES EFFETS REDOUTES	19
5. RÈGLES D'INSTALLATION, D'UTILISATION, DE MAINTENANCE ET D'INTERVENTION EN CAS D'INCIDENT	23
5.1 Préambule.....	23
5.2 Conditions générales d'utilisation.....	23
5.3 Règles spécifiques d'installation, d'utilisation, de maintenance et d'intervention en cas d'incident	23
5.3.1 Règles d'installation.....	24
5.3.2 Règles d'exploitation.....	28
5.3.3 Règles de maintenance	28
5.4 Règles d'intervention en cas d'incident (fuite, incendie...)	28
6. REFERENCES	31
7. LISTE DES ANNEXES	33

GLOSSAIRE

AFCE :	Alliance Froid Climatisation Environnement
BP :	Basse Pression
CCNUCC :	Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CE :	Communauté Européenne
CFC :	ChloroFluoroCarbure
CFD :	Computational Fluid Dynamics
CNPG :	Centre National d'Expertise des Professionnels de l'énergie Gaz
DESP :	Directive des Equipements Sous Pression
DGPR :	Direction Générale de Prévention des Risques
DGSCGC :	Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises
DN :	Diamètre Nominal (de tuyauterie)
DRV :	Débit Réfrigérant Variable
ECS :	Eau Chaude Sanitaire
EMI :	Energie Minimale d'Inflammation
ERP :	Etablissement recevant du public
FEDENE :	Fédération des services Energie Environnement
HCFC :	HydroChloroFluoroCarbure
HFC :	Hydrofluorocarbures
HP :	Haute Pression
LIE :	Limite Inférieure d'Explosivité
OEL :	Occupational Exposure Limit
PAC :	Pompe A Chaleur
PCI :	Pouvoir Calorifique Inférieur
PhD :	Phénomène Dangereux
SDM :	Salle Des Machines
SEI :	Seuil des Effets Irréversibles
SEL :	Seuil des premiers Effets Létaux
SELS :	Seuils des Effets Létaux Significatifs
TAI :	Température d'Auto-Inflammation
VCE :	Vapour Cloud Explosion

1. INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE

Les fluides frigorigènes actuellement utilisés dans les équipements de climatisation/réfrigération ou pompes à chaleur sont de puissants gaz à effet de serre qui peuvent également appauvrir la couche d'ozone. A ce titre, certains de leurs usages sont encadrés respectivement par les règlements européens n°1005/2009 (dit « Ozone ») et n°517/2014 (dit « F-Gaz ») résultant des engagements pris par l'Union Européenne au niveau international dans le cadre du protocole de Montréal et de la CCNUCC qui visent respectivement à limiter les émissions de substances appauvrissant la couche d'ozone et à limiter les émissions de gaz à effet de serre.

La disparition de CFC et des HCFC, qui présentaient de forts enjeux pour la couche d'ozone, est quasi-effective. Ce sont les HFC qui forment la majorité des fluides désormais utilisés et qui présentent un très fort pouvoir de réchauffement climatique. Le règlement européen prévoit une réduction d'environ 80% des quantités de HFC mises sur le marché entre 2015 et 2030, ainsi que de nombreuses interdictions ciblées par usage.

Une bonne partie des fluides alternatifs présentent des caractéristiques inflammables (légères ou plus marquées) ou toxiques.

Dans son courrier du 25 avril 2017 à la DGPR, la DGSCGC a exprimé son intention de faire évaluer les risques des fluides inflammables par l'INERIS dans le contexte d'une utilisation en ERP et, le cas échéant, de faire évoluer la réglementation des ERP pour maintenir le niveau de risque au niveau actuel.

1.2 ELEMENTS CONTRACTUELS

Cette étude fait suite :

- Au descriptif de programme additionnel, réf. DRA-17-169753-06310A, et daté du 10 juillet 2017.
- A votre accord par courrier, réf. SRSEDPD/2017-10, et daté du 19 juillet 2017.

1.3 OBJECTIF DE L'ETUDE

Cette étude évalue le risque lié à l'utilisation de fluides frigorigènes inflammables dans les équipements de conditionnement d'air (chaud, froid) et/ou de production d'eau chaude sanitaire (ECS) d'un ERP. L'objectif final est d'identifier de nouvelles règles d'installation, d'exploitation et de maintenance pour ces équipements, voire de reprendre des règles déjà existantes sur des équipements similaires utilisant déjà ces fluides, pour ne pas générer de surrisque.

Cette étude se décompose comme suit :

- Dans le chapitre 1, l'INERIS rappelle le champ investigué et précise quelques notions fondamentales nécessaires à la réalisation de l'étude.
- Dans le chapitre 1, l'INERIS s'appuie sur les enseignements des données de l'accidentologie pour expliciter sa méthodologie d'évaluation des risques. Dans ce chapitre, il est notamment précisé sur quels scénarii accidentels susceptibles d'impacter les équipements reposera la détermination des règles d'installation, d'exploitation et de maintenance.
- Dans le chapitre 1, l'INERIS synthétise les enseignements des travaux de quantification des effets des scénarii accidentels. L'INERIS profite de ce chapitre pour apporter des éléments d'appréciation de la fuite de fluide frigorigène pouvant être utile à l'action des pompiers en cas d'intervention.
- Dans le chapitre 1 sont regroupés toutes les règles dérivées de cette étude.

Cette étude a fait l'objet de 4 réunions :

- La réunion de démarrage, le 3 juillet 2017, entre des représentants du Ministère de l'Intérieur, du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et de l'INERIS.
- Deux réunions techniques, le 1^{er} août 2017, entre l'INERIS et successivement des représentants de la FEDENE et d'UNICLIMA.
- Un point d'avancement, le 10 octobre 2017, de la part de l'INERIS devant des représentants du Ministère de l'Intérieur et du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire.

2. DESCRIPTION DU CHAMP D'ETUDE

Dans cette étude sont considérés les systèmes thermodynamiques utilisant un fluide frigorigène afin de puiser des calories et/ou frigorifiques au sein d'un environnement existant pour les restituer à l'intérieur d'un ERP. De façon simplifiée, ces systèmes sont composés de quatre composants essentiels : un évaporateur, un condenseur, un compresseur et un détendeur.

Plus précisément, l'étude porte sur les systèmes dits à compression où le fluide frigorigène circule entre l'évaporateur et le condenseur grâce à un compresseur mécanique. Les systèmes dits à absorption, où la circulation du fluide frigorigène (souvent une solution d'eau et d'ammoniac ou d'eau et de bromure de lithium) est assurée par un compresseur thermo-chimique, ne sont donc pas couverts par cette étude. Cela exclut aussi les systèmes à effet Peltier, à froid magnétique et à combustion.

Enfin, cette étude se focalise plus particulièrement sur les systèmes à compression assurant les besoins d'un ERP en conditionnement d'air (chaud, froid) et/ou en production d'ECS. On se limite donc au cadre du confort thermique. Les armoires frigorifiques, souvent présentes dans les ERP (magasin, hôtel...), ne font donc pas partie du champ d'étude¹.

2.1 SCHEMAS D'IMPLANTATION POSSIBLES

La norme [NF EN 378, 2017] distingue 4 classes d'implantation :

- Classe I : l'ensemble du circuit thermodynamique est implanté dans l'ERP.
- Classe II : la partie Haute Pression (HP) du système thermodynamique est située à l'extérieur de l'ERP. Celle-ci peut être à l'extérieur, à même le sol ou en toiture-terrasse, ou bien abritée dans un cabanage, situé lui-même à même le sol ou en toiture-terrasse.
- Classe III : l'ensemble du circuit thermodynamique est implanté à l'extérieur de l'ERP. Ce circuit peut être à l'extérieur, à même le sol ou en toiture-terrasse, ou bien abrité dans un local spécifique (appelé salle des machines), situé lui-même à même le sol ou en toiture-terrasse. Dans ce cas, les calories et/ou frigorifiques sont apportées jusqu'à l'espace occupé par un circuit secondaire constitué d'un autre fluide frigorigène (par exemple, de l'eau glycolée).
- Classe IV : l'ensemble du circuit thermodynamique est situé dans une enceinte ventilée. Cette classification d'implantation ne concerne pas les équipements étudiés ici et donc ne sera pas abordée dans cette étude.

Une représentation schématique des 3 premières classes d'implantation est faite sur la Figure 1.

¹ Ces armoires frigorifiques font l'objet d'un guide en cours de révision au moment de la réalisation de cette étude (« guide M »).

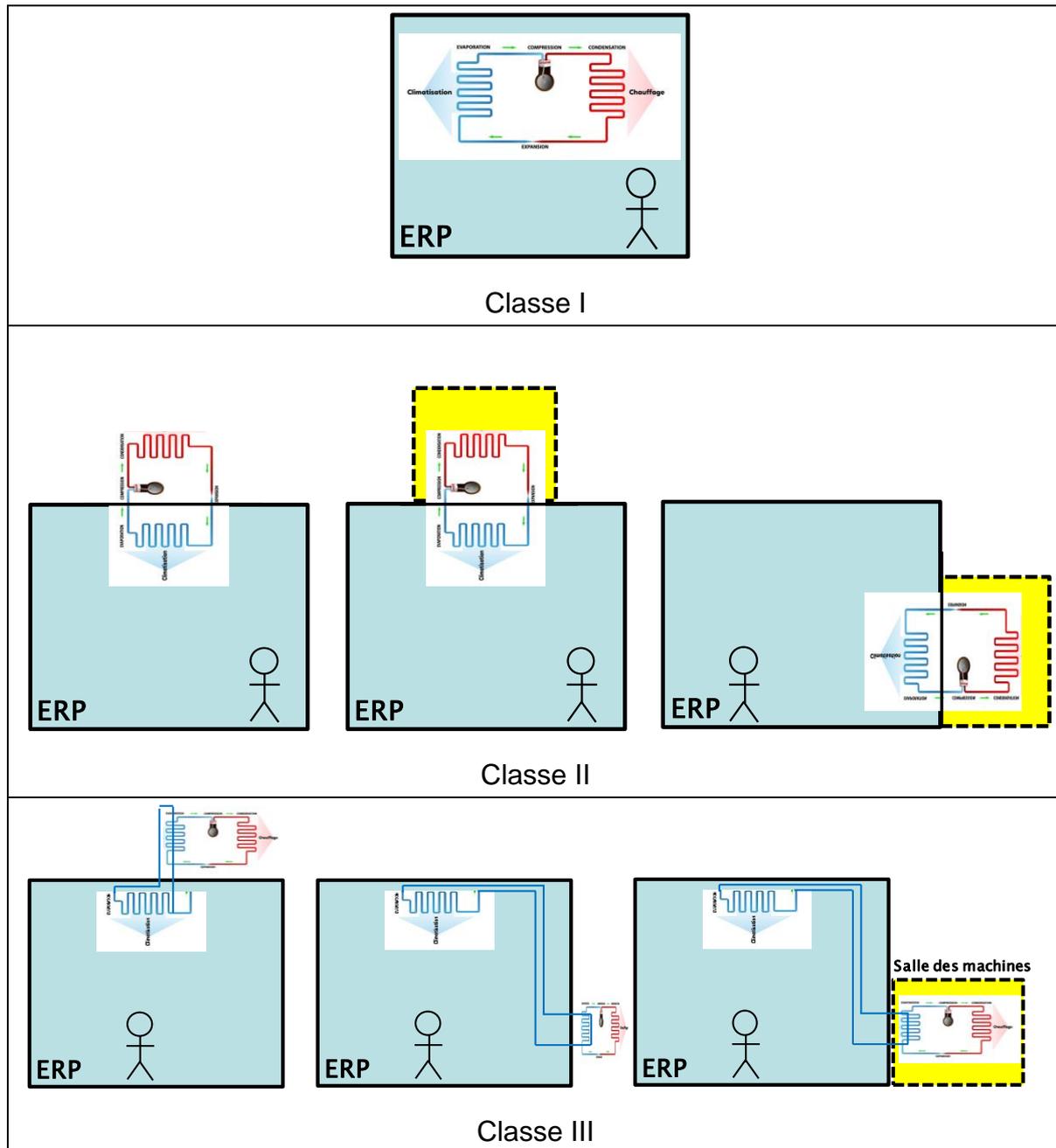


Figure 1. Schémas d'implantation possible du système thermodynamique

2.2 EXEMPLES D'EQUIPEMENTS VISES PAR L'ETUDE

Cette étude vise plusieurs équipements (cf. Figure 2), comme par exemple :

- La Pompe A Chaleur (PAC) monobloc : tous les composants du système thermodynamique sont situés dans un même package. Ce package est situé soit à l'extérieur, soit à l'intérieur de l'ERP et les calories/frigorifiques ainsi produites sont souvent transmises à un réseau d'eau pour assurer les besoins en confort thermique (plancher chauffant/rafraichissant, ventilo-convecteurs) et/ou en ECS (ballon d'eau chaude).

- Le mono-split : ce système est composé d'une unité extérieure et d'une seule unité intérieure pour réchauffer et/ou refroidir l'espace occupé. Il existe différents types d'unité intérieure : mural, plafonnier, cassette...
- Le multi-split : ce système est composé d'une unité extérieure et de plusieurs unités intérieures pour réchauffer et/ou refroidir l'espace occupé. Encore une fois, il existe différents types d'unité intérieure : mural, plafonnier, cassette...Ce type d'équipement est surtout utilisé lorsqu'on veut réchauffer et/ou climatiser plusieurs pièces (chambres d'un hôtel, salles de réunion...).
- Le DRV (ou « Débit Réfrigérant Variable ») : son principe de fonctionnement s'apparente à celui du multi-split avec une unité extérieure reliée à plusieurs unités intérieures. La principale différence réside dans le fait que, dans le DRV, chaque unité intérieure est équipée de son propre détendeur permettant ainsi de faire varier localement le débit du réfrigérant.
- Le rooftop : tous les composants du système thermodynamique sont situés dans un même package implanté en toiture-terrasse du bâtiment. Les calories/frigories ainsi produites sont transmises à l'ERP via un réseau de gaines aérauliques. Ce système est souvent utilisé dans les locaux de grandes surfaces (supermarché, entrepôts...).
- Le chiller : le principe de fonctionnement est le même que celui du rooftop mais la transmission de calories/frigories s'effectue par un réseau d'eau.

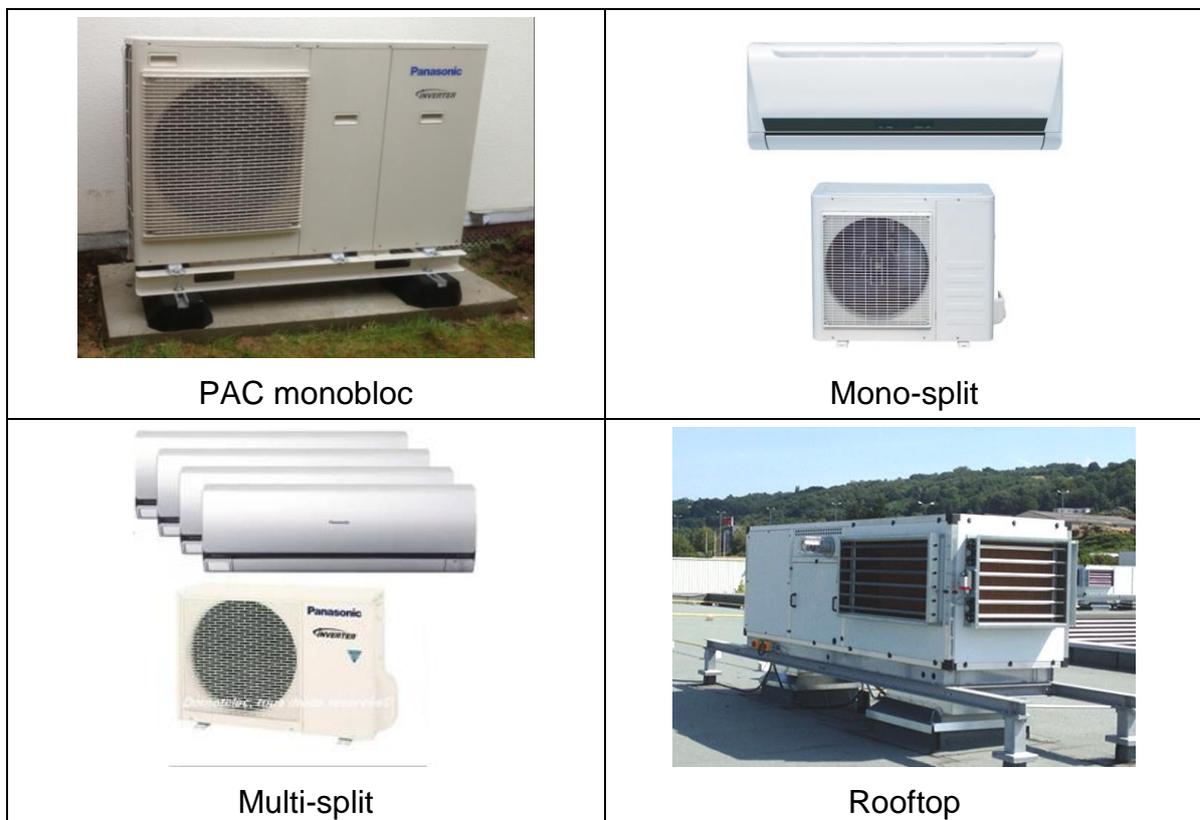


Figure 2. Exemples d'équipements visés par l'étude

2.3 CLASSIFICATION DES FLUIDES FRIGORIGENES

La norme [NF EN 378, 2017] dresse une classification pour les fluides frigorigènes (cf. Tableau 1):

	Faible toxicité ² (A)	Toxicité élevée (B)
Produit hautement inflammable	A3	B3
Produit inflammable	A2	B2
Produit légèrement inflammable	A2L	B2L
Pas de propagation de flamme	A1	B1

Tableau 1. Classification des fluides frigorigènes

Cette classification a été établie selon deux critères :

- Toxicité du fluide :
 - Tout fluide ayant une OEL (ou « Occupational Exposure Limit ») supérieure à 400 ppm est considéré comme un fluide de faible toxicité (colonne A).
 - Dans le cas contraire, ce fluide est de toxicité élevée (colonne B).
- Inflammabilité du fluide :
 - Au niveau le plus faible (A1 et B1), le fluide ne permet pas la propagation d'une flamme.
 - Au second niveau (A2L et B2L), le fluide a une Limite Inférieure d'Inflammabilité (LIE ou LFL³ en anglais) supérieure à 0,1 kg/m³, une chaleur de combustion inférieure à 19 MJ/kg et une vitesse laminaire de propagation de flamme inférieure à 10 cm/s. Avec de telles caractéristiques, il peut être considéré que ces fluides génèrent des effets thermiques mais pas d'effets de surpression.
 - Au troisième niveau (A2 et B2), le fluide a une LIE supérieure à 0,1 kg/m³ et une chaleur de combustion inférieure à 19 MJ/kg. Il n'y a plus de limite sur la vitesse laminaire de propagation de flamme. Dès lors, des effets thermiques et de surpression sont possibles.
 - Au dernier niveau (A3 et B3), le fluide a une LIE inférieure à 0,1 kg/m³ et une chaleur de combustion supérieure à 19 MJ/kg. Avec de telles caractéristiques, le nuage inflammable généré par la fuite

² Les fluides classés A ont une toxicité dite « faible » (OEL < 400 ppm). Pour autant, cela ne veut pas dire qu'ils ne sont pas toxiques. Dès lors, à ce stade, il est impossible d'exclure tout risque de toxicité, lié à l'utilisation de ces fluides.

³ LFL : Lower Flammability Limit

peut être de taille importante et générer des effets importants de surpression s'il rencontre une source d'énergie suffisante.

L'annexe 1 présente différents fluides frigorigènes en fonction de leur classification.

A l'heure actuelle, la réglementation autorise l'utilisation de tous les fluides frigorigènes classés A1 ou B1 ainsi que, sous conditions, des fluides B2 et B2L. L'Annexe 2 fait un point sur cette réglementation actuelle portant sur les équipements visés par l'étude.

Le rapport porte spécifiquement sur l'utilisation des fluides classés A2L, A2 et A3.

3. IDENTIFICATION DES SCENARIOS A CONSIDERER POUR L'APPROCHE ADOPTEE PAR L'INERIS

3.1 ENSEIGNEMENTS LIES A L'ACCIDENTOLOGIE

Pour compléter les informations sur l'accidentologie communiquées par la FEDENE et UNICLIMA, l'INERIS a fait des recherches dans les articles de la presse locale et dans la littérature scientifique.

De ces recherches, il apparait que :

- Il est difficile d'exploiter de manière quantitative les données de l'accidentologie du fait de l'imprécision et/ou du manque d'informations dans les faits relatés par la presse et dans les articles/publications scientifiques.
- La presse fait état de nombreux scenarii d'incendie ou d'éclatement ayant pour cause l'équipement (notamment le compresseur) et pas, à proprement parler, la nature du fluide frigorigène utilisé.
- Les systèmes thermodynamiques peuvent être sujets à des pertes de confinement. Celles-ci sont très majoritairement liées à des « petites » voire « moyennes » fuites.
- Les causes les plus fréquentes de ces fuites sont l'usure et la corrosion sur les tuyauteries et les raccords ou joints.
- Les éléments les plus sensibles du système thermodynamique sont les compresseurs et la tuyauterie Haute Pression (HP) en phase liquide.

3.2 REFLEXION SUR LE NIVEAU D'ACCEPTABILITE DES RISQUES

Le travail d'analyse des risques est présenté en Annexe 3 de ce rapport.

Les enjeux humains considérés dans cette étude sont ;

- Le personnel de l'ERP,
- Les utilisateurs de l'ERP (clients d'un magasin, personnes âgées d'une maison de retraite, malades d'un hôpital...),
- Les riverains de l'ERP,
- Les pompiers lors d'une intervention (incendie, inondation...).

Plusieurs approches sont possibles pour statuer sur le niveau d'acceptabilité du risque :

- **Approche n°1 - raisonner sur le nombre d'évènements possibles pour l'ensemble des équipements installés.**

Connaissant la fréquence d'occurrence du phénomène dangereux et le nombre d'équipements installés, il est possible de déterminer combien de

fois, en moyenne, ce phénomène dangereux peut survenir sur l'ensemble du parc installé au cours d'une année. L'acceptabilité du risque se fait alors en fonction du nombre d'événements sur une année.

Exemple : pas plus de 100 accidents/an sur l'ensemble du parc installé.

- **Approche n°2 – raisonner sur la notion de risque individuel en un point donné**

Connaissant la fréquence d'occurrence du phénomène dangereux et la probabilité d'observer un effet en un point donné du fait de ce phénomène dangereux, il est possible de déterminer la probabilité d'occurrence de cet effet en ce point. L'acceptabilité du risque se fait alors en fonction de la probabilité d'avoir un effet en un endroit donné.

Exemple : la probabilité de décès à moins de 1 m de l'équipement ne doit pas dépasser 1 pour 1 000 000.

- **Approche n°3 – utiliser une matrice d'acceptabilité du risque**

A l'instar de ce qui est fait pour les installations classées ou les tunnels, chaque phénomène dangereux peut être placé dans une matrice en fonction de sa fréquence d'occurrence et de sa gravité. De par son positionnement, il est alors possible de conclure sur le niveau d'acceptabilité du risque. A noter que cette approche nécessite un travail préliminaire de définition de la matrice (échelles à utiliser en fréquence et en gravité, domaine d'acceptabilité...).

- **Approche n°4 – éloigner les enjeux de telle sorte qu'ils ne soient pas exposés (approche déterministe)**

Des distances d'éloignement peuvent être proposées de telle sorte que les enjeux (personnel, utilisateur, riverain de l'ERP...) ne soient pas exposés aux effets attendus du phénomène dangereux.

Dans le cadre de cette étude, l'INERIS a retenu l'approche n°4, dite déterministe. En effet, toutes autres approches nécessitent la détermination de la fréquence d'occurrence du phénomène dangereux. Or, l'analyse de l'accidentologie a montré que l'évaluation de ce paramètre serait peu fiable.

Dans le cadre de cette approche déterministe, si l'éloignement des enjeux s'avère impossible, d'autres règles seront proposées par comparaison avec d'autres installations similaires et autorisées ([CNPG, 2015], [GZ, 2016], [NF EN 378, 2017]...).

3.3 IDENTIFICATION DES SCENARIOS A CONSIDERER

Pour les besoins de cette étude, l'INERIS distingue 3 typologies de fuite :

- La « petite » fuite, correspondant à un orifice de diamètre inférieur ou égal à 1% de celui de la tuyauterie (en d'autres termes, la section de fuite est au maximum 10 000 fois plus petite que celle de la tuyauterie).
- La « moyenne » fuite, correspondant à un orifice de diamètre entre 1 et

10% de celui de la tuyauterie (en d'autres termes, la section de fuite est au maximum 100 fois plus petite que celle de la tuyauterie).

- La fuite catastrophique, correspondant à un orifice de diamètre entre 10 et 100% de celui de la tuyauterie (en d'autres termes, la section maximale de fuite équivaut à celle de la tuyauterie).

Pour les besoins de cette étude, l'INERIS propose :

- De prendre en compte le risque de rupture franche de tuyauterie dans l'établissement des règles permettant de limiter la probabilité d'occurrence d'une telle fuite.
- De déterminer les distances d'éloignement au regard des résultats obtenus lors de la modélisation des « petites » et « moyennes » fuites.

Comme les équipements visés par cette étude ont des diamètres de tuyauterie autour de 10 mm, les scénarios utilisés pour la détermination du périmètre d'éloignement seront donc de l'ordre du mm.

Comme le condenseur et la tuyauterie HP sont les éléments à priori les plus sensibles du système thermodynamique, l'INERIS considérera que ces scénarios de fuite ont lieu sur la phase liquide sous pression du fluide frigorigène et en HP.

4. SYNTHÈSE SUR LA PHÉNOMÉNOLOGIE DES EFFETS REDOUTES

Le lecteur pourra consulter l'ensemble des données de modélisation dans l'Annexe 4. Dans cette annexe sont présentés :

- Les mécanismes physiques mis en jeu en cas de fuite accidentelle de fluide frigorigène.
- Les différents phénomènes dangereux redoutés (feu torche, explosion dans le jet/dans la nappe de gaz...).
- Les hypothèses de modélisation ayant servi à la quantification des effets des différents phénomènes dangereux.
- Les résultats des modélisations.

De ce travail, on peut en tirer les enseignements principaux suivants :

- Sur les mécanismes mis en jeu en cas de fuite accidentelle de fluide frigorigène :
 - Puisque la fuite se fait sous pression, il est probable que celle-ci soit audible si l'environnement n'est pas trop bruyant. L'intensité du bruit (exprimé en dB) est généralement proportionnelle à la pression de fuite (P) et au diamètre (D) au carré de l'orifice de fuite ($\propto D^2 \times P$)
 - Dans le cas d'une fuite de liquide sous pression, la température dans le jet peut suffisamment chuter pour que l'humidité de l'air ambiant se condense. Dès lors, le nuage émis devient visible. En cas de fuite sur le circuit, survenant sur la phase liquide du fluide frigorigène, il est donc probable que la fuite soit visible. En fonction de l'ampleur de cette fuite et de sa localisation dans le bâtiment, il faut noter que l'évacuation de l'ERP peut être rendue difficile (perte de visibilité dans le bâtiment).
 - Dans le cas d'une fuite de liquide sous pression, du fait de la présence de gouttelettes (= masse condensée) en son sein et de la baisse de température, la fuite aura plutôt tendance à avoir un comportement de gaz lourd et à ramper au sol.
 - Toujours dans le cas d'une fuite liquide sous pression, et plus particulièrement si celle-ci survient dans un environnement fortement encombré, la formation d'une flaque (ou « rain-out ») est possible au sol. Plusieurs stratégies sont possibles pour gérer cette flaque :
 - Soit elle est canalisée « naturellement » vers une zone sûre ;
 - Soit on la laisse s'évaporer (si aucun enjeu dans le champ proche) ;
 - Soit on met de la mousse sur le flaque. Point de vigilance : il ne faut pas essayer de diluer la flaque avec de l'eau car cela peut revigorer la vaporisation de la flaque.

- La fuite purement gazeuse ne sera pas nécessairement visible. Elle ne conduira pas à la formation d'une flaque.
- Sur la nature des phénomènes redoutés :
 - En cas de fuite de fluide frigorigène, plusieurs phénomènes dangereux (PhD) sont susceptibles de se produire :
 - Le VCE (ou Vapour Cloud Explosion) : cela concerne le rejet atmosphérique d'un produit inflammable qui, après s'être mélangé avec l'oxygène de l'air ambiant pour former un mélange inflammable, rencontre une source d'inflammation d'énergie suffisante. Effets attendus : surpression (VCE) + thermiques (feu de nuage).
 - La fuite enflammée (ou feu torche) : ce phénomène prend naissance sous forme d'une flamme de diffusion lorsqu'un jet liquide ou gazeux issue d'une fuite accidentelle s'enflamme en rencontrant une source d'inflammation. Effets attendus : thermiques + toxicité des fumées.
 - Anoxie : ce risque est dû à une teneur très faible en oxygène dans un espace confiné pouvant résulter du remplacement de l'oxygène par un autre gaz (= fluide frigorigène) lors d'une fuite accidentelle.

Le Tableau 2 présente les phénomènes dangereux pouvant être observés en fonction de la classe du fluide frigorigène.

- Dans le cas du VCE, il convient de garder à l'esprit que ce phénomène dangereux peut survenir en plusieurs endroits selon la localisation du point de fuite :
 - Dans le jet lui-même. En effet, le fluide frigorigène étant à l'état pur dans le système frigorifique, sa concentration va donc varier de 100% v/v au point de fuite à 0 ppm dans le champ lointain. Inéluctablement, il y aura une zone où le champ de concentration sera dans la plage d'explosivité. En cas d'inflammation, on aura alors un VCE dans le jet.
 - Dans le local. En effet, si la fuite survient dans un local et que ce dernier n'est pas bien ventilé, le réfrigérant pourra s'accumuler dans le local et former de nouveau un mélange inflammable. Compte tenu du comportement de gaz lourd de la fuite, ce mélange inflammable sera plutôt présent en partie basse de l'ERP.

Compte tenu de cette discussion, le VCE dans le jet est à considérer pour toute fuite accidentelle de fluide frigorigène tandis que le VCE dans la nappe de gaz est à considérer uniquement si la fuite accidentelle a lieu en intérieur.

PhD	Effets attendus	Classement du fluide frigorigène		
		A3	A2	A2L
Feu torche	Thermique + Toxique	Oui	Oui	Oui
Feu de nuage	Thermique	Oui	Oui	Oui
VCE	Surpression	Oui	Oui	Non
Dispersion	Anoxie	Oui	Oui	Oui

(a) Fluides frigorigènes classés A

Tableau 2. PhDs et effets attendus en fonction du classement du fluide

- Sur les résultats de modélisation :
 - Risque d'anoxie lié à la fuite : même risque que pour les fluides (déjà autorisés) de classes A1.
 - Risque lié à la toxicité des fumées en cas de feu torche de la fuite : risque plutôt moindre par rapport aux fluides (déjà autorisés) de classes A1.
 - Risque lié à l'inflammation d'une fuite de fluide frigorigène :
 - L'inflammation d'une fuite de fluides classés A2L et B2L ne générera pas d'effets de surpression du fait de leur faible vitesse laminaire de propagation de flamme (propriété intrinsèque aux fluides de cette classe).
 - En cas de rupture franche de tuyauterie :
 - La distance à la LIE peut aller de quelques mètres jusqu'à plusieurs dizaines de mètres en fonction du diamètre de la tuyauterie et de la pression dans le système.
 - Les distances d'effets thermiques pour tous les fluides, et de surpression pour les fluides A2 et A3, peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres.
 - En cas de petites et moyennes fuites :
 - La distance à la LIE se limite à quelques mètres. Cette distance est relativement indépendante du fluide considéré et de la pression dans le système.
 - Risque lié à la formation d'une nappe de gaz inflammable :
 - Compte tenu de la diversité des situations pouvant être rencontrées sur le terrain (géométrie du local, taux horaire de renouvellement d'air, localisation des entrées/sorties d'air...), l'approche proposée par la norme NF EN 378 est

intéressante. Celle-ci consiste à limiter la charge frigorifique pouvant fuir dans un local de telle sorte que la concentration maximale, atteinte au niveau du sol du fait du comportement lourd de la fuite, ne puisse pas atteindre la LIE du fluide frigorigène concerné. Cette charge maximale est donnée par l'Equation 1.

$$m_{\max} = 2,5 \times LFL^{5/4} \times h_0 \times A^{1/2} \quad \text{Équation 1}$$

Où :

m_{\max} [kg] correspond à la charge maximale en fluide inflammable,

LFL [kg/m³] à la limite inférieure d'inflammabilité⁴,

A [m²] à la surface de l'ERP où circule le système thermodynamique,

h_0 correspond à un coefficient lié à la hauteur de l'équipement ou tuyauterie, situé le plus bas dans le local :

= 0,6 pour un emplacement au sol,

= 1,1 pour un montage sur fenêtre,

= 1,8 pour un emplacement au mur,

= 2,2 pour un montage au plafond.

Cette équation est issue des travaux de [KATAOKA, YOSHIZAWA et HIRAKAWA, 2000].

De ces résultats, il conviendra de maîtriser les risques associés aux scénarios de petite et moyenne fuites en excluant toute présence de source d'inflammation dans la zone proche de la tuyauterie. Les modélisations ont montré que les dimensions de cette zone sont relativement indépendantes de la classification en inflammabilité du fluide frigorigène considéré et se limite à quelques mètres. Cette distance ainsi que les règles définies dans le chapitre 6 sont comparables et cohérentes avec celles des articles GZ relatifs aux équipements de chaufferie employant des fluides inflammables déjà encadrés par le règlement de sécurité des ERP.

⁴ Lower Flammability Limit en anglais

5. REGLES D'INSTALLATION, D'UTILISATION, DE MAINTENANCE ET D'INTERVENTION EN CAS D'INCIDENT

L'objectif de cette étude était d'évaluer les risques liés à l'utilisation des fluides inflammables dans les équipements de conditionnement d'air et/ou de production d'ECS. Ce chapitre propose des mesures supplémentaires à mettre en place si ces fluides venaient à être autorisés.

5.1 PREAMBULE

L'INERIS ne considère pas pertinent d'opérer une différenciation des règles selon la classe d'inflammabilité du fluide (pas de différence entre A2L, A2 et A3).

Les conditions générales d'utilisation des fluides frigorigènes pour les applications de conditionnement d'air et/ou de production d'ECS doivent respecter les dispositions suivantes.

Remarque : dans ce qui suit, le texte surligné en bleu correspond aux règles proposées par cette étude. Les autres règles sont issues d'autres documents et sont jugées pertinentes pour les objectifs visés.

L'Annexe 5 compare les prescriptions issues de cette étude par rapport à celles du GZ pour démontrer que, en appliquant ces règles pour les fluides inflammables, le niveau de risques sera équivalent à l'intérieur de l'ERP.

L'annexe 6 présente une application de ces règles sur quelques cas tests.

5.2 CONDITIONS GENERALES D'UTILISATION

Lorsque les équipements à compresseur incorporé utilisant ces fluides sont placés dans les locaux accessibles au public, les compresseurs doivent être du type hermétique ou hermétique accessible (§2 du CH35).

Dès lors que le circuit passe dans un (ou plusieurs) local(aux), la capacité totale de fluide inflammable présente dans ce circuit (équipements et tuyauterie associée) ne doit pas dépasser la charge calculée à partir de l'Equation 1 en prenant les caractéristiques du local le plus pénalisant.

5.3 REGLES SPECIFIQUES D'INSTALLATION, D'UTILISATION, DE MAINTENANCE ET D'INTERVENTION EN CAS D'INCIDENT

Les installations doivent respecter les règles spécifiques d'installation, d'utilisation, de maintenance et d'intervention en cas d'incident telles que précisées dans ce paragraphe.

5.3.1 REGLES D'INSTALLATION

Les règles suivantes sont à appliquer indifféremment du classement du fluide frigorigène.

<ul style="list-style-type: none">• Les installations de conditionnement d'air et/ou de production d'ECS doivent être réalisées selon les règles de l'art, par des personnes compétentes, avec des équipements et matériels adaptés répondant au(x) norme(s) obligatoires en vigueur (§ 4 modifié du CH35).• L'installation du système thermodynamique doit respecter les règles préconisées par le fournisseur (endroit bien aéré, absence de vibrations...).	Général
<ul style="list-style-type: none">• Les canalisations contenant les fluides frigorigènes sont métalliques (§7 du CH35 – repris sans modification)• Le nombre de brides et de raccords sur le circuit du système thermodynamique est limité.• Le cheminement de la tuyauterie et la position des équipements doivent permettre de réduire leur vulnérabilité aux agressions mécaniques. A défaut, une protection mécanique doit être envisagée.	Maitrise risque de perte de confinement
<ul style="list-style-type: none">• Un cheminement extérieur est privilégié pour le circuit du système thermodynamique, plongeant au dernier moment dans l'ERP.	Maitrise risque de dispersion

Pour les parties du circuit à l'extérieur :

<ul style="list-style-type: none">• Les équipements installés en extérieur sont conçus et adaptés pour fonctionner à l'extérieur des bâtiments conformément aux conditions d'installation définies dans la notice d'utilisation du fabricant (cf. CH5, CH6 et CH40)• La conception doit prendre en compte les risques de corrosion (§2 du GZ16).• Le diamètre max des tuyauteries véhiculant le fluide sous sa forme liquéfié doit rester inférieur ou égal à 50 mm (justification : protection des personnes à l'extérieur).• Ces parties du circuit doivent être accessibles aux seules personnes autorisées.• Pour les parties situées au sol : mise en place d'une protection mécanique (exemple : plots métalliques...) permettant de protéger ces parties contre d'éventuels chocs liés à la circulation de véhicules à moteur (justification : cela permet d'écarter tout risque de rupture franche de tuyauterie) (cf. CNPG).	Maitrise risque de perte de confinement
---	---

<ul style="list-style-type: none"> • Les calorifuges utilisés pour l'isolation des tuyauteries et équipements contenant le fluide doivent être réalisés en matériau de catégorie D-s1,d0 (cf. CH25 et §7 du CH35). • Les parois constituant l'enveloppe de cette partie sont construites en matériau classé A2-s1,d0 (cf. CH5 et CH6). • Pour les équipements du circuit situés en toiture-terrasse : ces équipements doivent être installés (cf. CH5, CH6 et CNPG) : <ul style="list-style-type: none"> ○ Soit sur une assise (dalle, socle, soubassement) EI60 réalisée en éléments classés A2-s1,d0. ○ Soit sur des plots en matériau A2-s1,d0, de façon à obtenir une isolation thermique sous toute sa surface par une lame d'air ventilée de 20 cm d'épaisseur. 	Maitrise risque d'incendie
---	----------------------------

Pour les parties d'installation dans la salle des machines (SDM) :

<ul style="list-style-type: none"> • Les parois de la SDM doivent être REI60 et réalisées en éléments classés A2-s1,d0. Les matériaux de la toiture et du sol sont respectivement classés A2-s1,d0 et A2fl-s1. 	Maitrise risque d'incendie
<ul style="list-style-type: none"> • La SDM doit être accessible aux seules personnes autorisées. • Il ne doit pas y avoir de communication directe entre cette SDM et l'ERP accueillant le public. • Il faut être vigilant sur le positionnement du rejet de l'extraction de la SDM par rapport aux ouvrants tiers et aux prises d'air neuf (cf. CNPG). • L'air extrait de la SDM ne doit pas être recyclé dans d'autres locaux (cf. CH33). 	Protection des personnes

Les règles suivantes sont applicables aux fluides inflammables :

<ul style="list-style-type: none"> • Pour les parties d'installation à l'intérieur des locaux accessibles au public : <ul style="list-style-type: none"> ○ Dans l'ERP, pas de diamètre supérieur à 50 mm dans l'ERP. ○ Si le système thermodynamique est équipé d'une soupape, le rejet de celle-ci doit être évacué en dehors de l'ERP (rejet canalisé) (cf. CNPG). 	<p>Maitrise risque de perte de confinement</p>												
<ul style="list-style-type: none"> • Pour les parties du circuit situées à l'intérieur : <ul style="list-style-type: none"> ○ Les calorifuges utilisés pour l'isolation des tuyauteries et équipements contenant le fluide doivent être réalisés en matériau de catégorie A2-s1,d0 (cf. CH25 et §7 du CH35). ○ Pas de source d'inflammation (flamme nue, étincelle...) à moins de Y m de la tuyauterie. Cette distance Y est donnée par le tableau suivant : <table border="1" data-bbox="320 936 1118 1160"> <tr> <td>Diamètre D de la tuyauterie [mm]</td> <td>≤ 10</td> <td>10 < D ≤ 20</td> <td>20 < D ≤ 50</td> </tr> <tr> <td>Si tuyauterie dans ERP fait circuler la phase liquide</td> <td>2</td> <td>4</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Sinon</td> <td colspan="2">1</td> <td>2</td> </tr> </table>	Diamètre D de la tuyauterie [mm]	≤ 10	10 < D ≤ 20	20 < D ≤ 50	Si tuyauterie dans ERP fait circuler la phase liquide	2	4	10	Sinon	1		2	<p>Maitrise risque d'incendie</p>
Diamètre D de la tuyauterie [mm]	≤ 10	10 < D ≤ 20	20 < D ≤ 50										
Si tuyauterie dans ERP fait circuler la phase liquide	2	4	10										
Sinon	1		2										
<ul style="list-style-type: none"> • Pour les parties du circuit situées à l'extérieur : <ul style="list-style-type: none"> ○ Ces parties doivent être implantées à plus de X m en distance horizontale de toute source d'inflammation possible, de toute zone accessible au public et de toute voie publique. Cet éloignement X est donné par le tableau suivant : <table border="1" data-bbox="320 1417 1118 1581"> <tr> <td>Diamètre D de la tuyauterie faisant circuler la phase liquide [mm]</td> <td>≤ 10</td> <td>10 < D ≤ 20</td> <td>20 < D ≤ 50</td> </tr> <tr> <td>X [m]</td> <td>2</td> <td>4</td> <td>10</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> ○ Cet éloignement doit être matérialisé par un mur ou une clôture d'au moins 2 m de haut (adéquation avec CH5). ○ Ces parties doivent être implantées suffisamment loin de tout orifice de ventilation ou ouvrant pour prévenir l'accumulation de fluide inflammable en cas de fuite sur le circuit. 	Diamètre D de la tuyauterie faisant circuler la phase liquide [mm]	≤ 10	10 < D ≤ 20	20 < D ≤ 50	X [m]	2	4	10	<p>Maîtrise du risque d'inflammation</p>				
Diamètre D de la tuyauterie faisant circuler la phase liquide [mm]	≤ 10	10 < D ≤ 20	20 < D ≤ 50										
X [m]	2	4	10										
<ul style="list-style-type: none"> • Pour les parties d'installation à l'intérieur des locaux accessibles au public : <ul style="list-style-type: none"> ○ La charge en fluide frigorigène, susceptible de fuir dans l'ERP, doit être limitée à la valeur donnée par 	<p>Maitrise risque d'explosion</p>												

l'Equation 1.

- Pour la partie d'installation située en salle des machines (SDM) :
 - La salle des machines doit comporter au moins deux orifices de ventilation donnant sur l'extérieur, situés à deux hauteurs différentes.
 - La charge en fluide frigorigène a été calculée à partir de l'Equation 1 en utilisant les caractéristiques de la SDM ?
 - OUI : pas de mesure supplémentaire. La ventilation naturelle du local est suffisante.
 - NON : La SDM doit être équipée d'un extracteur d'air mécanique adapté au risque d'explosion (matériel ATEX 2) et garantissant un taux horaire suffisant de renouvellement d'air (pour être en deçà de la LIE en sortie d'extraction). La SDM est pourvue d'un dispositif de détection qui, en cas de fuite, a pour effet de (1) déclencher l'extracteur d'air mécanique et (2) d'arrêter le système. Ce dispositif de détection est composé d'une centrale de détection et de deux capteurs placés judicieusement en fonction de la nature du fluide utilisé (justification : en fiabilisant cette barrière, on peut s'affranchir de matériel ATEX dans l'ensemble du local). Un dispositif d'avertissement automatique signale toute défaillance du système de détection et d'extraction d'air.
 - Le rejet à l'extraction doit être implanté suffisamment loin de tout orifice de ventilation ou ouvrant pour prévenir l'accumulation de fluide inflammable en cas de fuite sur le circuit.

5.3.2 REGLES D'EXPLOITATION

L'INERIS propose les règles suivantes :

- Les installations de réfrigération, conditionnement d'air, y compris pompes à chaleur, doivent être entretenues, conformément aux règles et normes en vigueur, par des personnes compétentes avec des équipements et matériels répondant aux exigences de ces normes.
- L'exploitant doit conserver un tracé du cheminement du réseau de son système thermodynamique (cf. CH4) (justification : cela évite que les pompiers tapent là où il ne faut pas en cas d'incendie).
- Le réseau doit être marqué (cf. [INRS, 2015]).
- Les réseaux aérauliques des ERP ne doivent pas être communs avec les réseaux des locaux tiers (adéquation avec CH38).
- Toute modification de l'installation fait l'objet d'une analyse des conséquences et d'une mise à jour des documents associés.

5.3.3 REGLES DE MAINTENANCE

L'INERIS propose les règles suivantes :

- Les opérations de maintenance doivent être réalisées par des personnes compétentes désignées par le fabricant concerné. Elles doivent être réalisées conformément au manuel de maintenance fourni par le fabricant.
- Ces opérations peuvent avoir lieu :
 - En usine
 - Sur site, sous réserve de prendre les mesures adaptées (par exemple, arrêt du système thermodynamique, balisage d'un périmètre d'intervention...).

5.4 REGLES D'INTERVENTION EN CAS D'INCIDENT (FUITE, INCENDIE...)

L'INERIS fait les remarques suivantes :

- La fuite gazeuse ou diphasique sera audible si elle se fait sous pression. Le bruit exprimé en dB est généralement proportionnel à $D^2 \times P$ avec D le diamètre de fuite et P la pression de rejet.
- La fuite diphasique sera visible du fait de la condensation de l'humidité de l'air ambiant entraîné dans le jet. Dans le cas d'une grosse fuite, cela peut même perturber la visibilité (impact éventuel sur l'évacuation).
- La fuite diphasique aura plutôt à ramper au niveau du sol du fait de la présence en son sein de gouttelettes (= masse condensée) et de la baisse de température.
- Dans le cas d'une fuite diphasique, impactant rapidement un obstacle (mur...), on peut s'attendre à la formation d'une flaque. Plusieurs stratégies sont possibles pour gérer cette flaque :
 - Soit elle est canalisée « naturellement » vers une zone sûre,

- Soit on la laisse s'évaporer (si aucun enjeu dans le champ proche),
- Soit on met de la mousse sur la flaque.

Mais attention, il ne faut pas diluer la flaque avec de l'eau car cela peut revigorer sa vaporisation.

- Le fait de pouvoir utiliser d'autres fluides frigorigènes que ceux classés A1 ne générera pas de surrisque du point de vue du risque d'anoxie en cas de fuite et du point de vue de la toxicité des fumées en cas de feu torche.

6. REFERENCES

AFCE, « Etude sur le confinement des fluides frigoriènes », étude réalisée par le Cemafruid et IRSTEA et cofinancée par l'ADEME, n° de convention 1481C0048, 23 juin 2015.

AYERS, J. « Parasense study on refrigerant leaks », Parasense Ltd, Gloucester, UK, novembre 2000.

CPG, « Cahier des charges relatif à l'implantation d'unités de production thermodynamique reliées aux circuits de chauffage et/ou de production d'eau chaude sanitaire et/ou de climatisation d'immeubles collectifs d'habitation ou de maisons individuelles – décision ministérielle », CDC CNPG N°001, version mai 2015.

FORSCHUNGSRAT KÄLTETECHNIK (Research Council for Refrigeration Technology), "Tightness of Commercial Refrigeration Systems".

FRANCIS C., MAIDMENT G. et DAVIES G., « An investigation of refrigerant leakage in commercial refrigeration », International Journal of Refrigeration, vol. 74, pp 12 – 21, 2017.

GZ, « Chapitre VI – Articles « GZ » - Installations aux gaz combustibles et aux hydrocarbures liquéfiés (Arrêté du 23 janvier 2004) », Règlement Sécurité Incendie ERP – Documentation BATISS – Arrêté du 25 juin 1980 modifié, version 28/04/2016.

HANDBOOK FAILURE FREQUENCIES, « Background Information – Appendix to Handbook Failure Frequencies 2009 for drawing up a safety report », 05/05/2009.

INERIS, « Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA-35) – Toxicité et dispersion des fumées d'incendie – Phénoménologie et modélisation des effets - Ω -16 », rapport d'étude n°57149, 17/03/2005.

INERIS, « Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA-76) - Ω -8 – Feu torche », DRA-14-133133-02917A, 10/03/2014

INERIS, « Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (EAT-DRA-76) – Les explosions non confinées de gaz et de vapeurs - Ω UVCE », DRA-16-133610-06190A, 23/06/2016.

INRS, « Fiche pratique de sécurité ED88 – Codage couleur des tuyauteries rigides », 2^{ème} édition, novembre 2015.

KATAOKA O., YOSHIZAWA M. et HIRAKAWA T., « Allowable Charge Calculation Method for Flammable Refrigerants », International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Paper 506, 2000.

KATAOKA O., « Safety considerations when working with 2L flammability class refrigerants », To be presented before the Institute of Refrigeration at London Chamber of Commerce and Industry, 2013.

NF EN 378, « Systèmes frigorifiques et pompes à chaleur – Exigences de sécurité et d'environnement », Parties 1, 2, 3 et 4, 2017.

RIVM, "Reference Manual Bevi Risk Assessments", version 3.1, 01/01/2009.

7. LISTE DES ANNEXES

Annexe	Titre	Nombre de pages
1	Inventaire de fluides frigorigènes (non chlorés) par classe	2
2	Point sur les textes et réglementations de référence	7
3	Analyse des risques	20
4	Quantification des effets	33
5	Comparaison des prescriptions issues de cette étude avec celles du GZ (discussion limitée aux fluides inflammables)	4
6	Fiches pratiques	9
7	Supports présentés lors du colloque des responsables départementaux prévention des services d'incendie et de secours du 1 ^{er} décembre 2017	10

ANNEXE 1 : Inventaire de fluides frigorigènes (non chlorés) par classe

Fluides classés A1 :
R14, R23 R116, R125, R134 R218, R227ea, R236fa Rc378 R404a, R407a-b-c-d-e-f, R410a-b, R417a-b-c, R421a-b, R422a-b-c-d-e, R423a, R424a, R425a, R426a, R427a, R428a, R434a, R437a, R438a R507a, R508a-b R744
Fluides classés B1 :
R245fa
Fluides classés A3 :
R50 Re170 R290 R429a, R430a, R431a, R432a, R433a-c, R435a, R436a-b R510a, R511a R600, R600a, R601, R601a R1150, R1270
Fluides classés A2 :
R152a R413a, R439a, R440a
Fluides classés A2L :
R32 R143a, R1234yf, R1234ze
Fluides classés B3 :
Aucun à l'heure actuelle
Fluides classés B2 :
Aucun à l'heure actuelle
Fluides classés B2L :
R717

ANNEXE 2 : Point sur les textes et réglementations de référence

Cette annexe recense différentes réglementations potentiellement applicables aux équipements visés par l'étude en fonction des fluides utilisés, des caractéristiques des systèmes... ainsi que les textes qui s'appliquent à des installations comparables de par leur fonctionnement. Ces textes pourront servir pour définir des règles pour les installations visées dans notre étude.

Tout d'abord, les directives européennes formalisent des exigences que les Etats doivent retranscrire dans des textes nationaux. Ces directives sont complétées par des normes qui, sans être obligatoires, fournissent un outil pour la présomption de conformité d'un produit aux exigences minimales. Elles aboutissent à un marquage de conformité (« CE » associé de mentions complémentaires) qui permet au fabricant de mettre sur le marché son produit et d'en faciliter sa libre circulation.

Ensuite, on trouve les textes nationaux (décrets, arrêtés d'application...) qui s'appliquent en général à des contrôles d'équipements en service ou qui consistent en des réglementations transversales relatives à la sécurité.

1. DIRECTIVES EUROPEENNES ET TEXTES ASSOCIEES

1.1 ATMOSPHERES EXPLOSIBLES

La directive 2014/34/UE concerne les fabricants d'appareils et de systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphère explosible.

La directive 99/92/CE, relative aux prescriptions visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque d'atmosphère explosible, a été transposée dans le droit français par les articles R. 4216-31 et R. 4227-42 à R. 4227-54 du code du travail.

L'arrêté du 8 juillet 2003 complète ces articles en transposant les annexes de la directive et en précisant :

- La classification des emplacements où des atmosphères explosibles peuvent se présenter ;
- Les prescriptions visant à améliorer la protection des travailleurs exposés aux risques d'explosion ;
- Les critères de sélection des systèmes de protection.

Enfin, l'arrêté du 28 juillet 2003 fixe les conditions d'installation des matériels électriques dans les emplacements où des atmosphères explosibles peuvent se présenter.

1.2 EQUIPEMENTS SOUS PRESSION

Les installations visées par l'étude sont concernées par la directive 2014/68/UE relative aux équipements sous pression (autrement appelée DESP) dans la mesure où elle s'applique à tous les équipements ayant une pression maximale admissible supérieure à 0,5 bar. Cette directive est transposée dans le droit français par le décret 99-1046 du 13 décembre 1999. Parmi les normes harmonisées de la DESP, on peut en relever un certain nombre qui s'appliquent à un système thermodynamique :

EN 378-2 :2008+A2 :2012	Refrigerating systems and heat pumps – Safety and environmental requirements – Part 2: Design, construction, testing, marking and documentation
EN 14276-1:2006+A1:2011	Pressure equipment for refrigerating systems and heat pumps – Part 1: Vessels – General requirements
EN 14276-2:2007+A1:2011	Pressure equipment for refrigerating systems and heat pumps – Part 2: Piping – General requirements
EN 12178:2003	Refrigerating systems and heat pumps – Liquid level indicating devices – Requirements, testing and marking
EN 12263:1998	Refrigerating systems and heat pumps – Safety switching devices for limiting the pressure – Requirements and tests
EN 12284:2003	Refrigerating systems and heat pumps – Valves – Requirements, testing and marking

EN 12735-1:2016	Copper and copper alloys – Seamless, round tubes for air conditioning and refrigeration – Part 1: Tubes for piping systems
EN 12735-2:2016	Copper and copper alloys – Seamless, round tubes for air conditioning and refrigeration – Part 2: Tubes for equipment
EN 13136:2013	Refrigerating systems and heat pumps – Pressure relief devices and their associated piping – Methods for calculation

Tableau 1. Récapitulatif des normes harmonisées pertinentes de la DESP

En service, certains de ces équipements sont soumis à l'arrêté du 15 mars 2000 qui prévoit des contrôles et des requalifications périodiques en fonction de leur catégorie (déterminée par les produits : *Pression x Volume* ou *Pression x Diamètre*) et du fluide concerné.

Les cahiers techniques professionnels n°1, 2 et 3 ont été rédigés pour que les équipements frigorifiques sous pression puissent bénéficier d'aménagement aux exigences de l'arrêté du 15 mars 2000 modifié pour les opérations suivantes :

- Vérifications intérieures lors des inspections périodiques ;
- Vérifications extérieures des parois métalliques des tuyauteries et récipients calorifugés lors des inspections et requalifications périodiques ;
- Epreuves lors des requalifications périodiques.

1.3 MACHINES

Les installations visées par l'étude sont concernées par la directive 2006/42/CE (autrement appelée Machines). Cette directive est transposée dans la réglementation par le décret n°2008-1156 du 7 novembre 2008 relatif aux équipements de travail et aux équipements de protection individuelle. Parmi les normes harmonisées de la Directive Machines, on peut citer :

EN ISO 12100:2010	Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction
EN 378-2:2016	Refrigerating systems and heat pumps – Safety and environmental requirements – Part 2: Design, construction, testing, marking and documentation
EN 12693:2008	Refrigerating systems and heat pumps – Safety and environmental requirements – Positive displacement refrigerant compressors
EN 60335-2-40:2003	Household and similar electrical appliances – Safety – Part 2-40: Particular requirements for electrical heat pumps, air-conditioners and dehumidifiers. IEC 60335-2-40:2002 (Modified)
EN 60335-2-89:2010	Household and similar electrical appliances – Safety – Part 2-89: Particular requirements for commercial refrigerating appliances with an incorporated or remote refrigerant condensing unit or compressor.

Tableau 2. Récapitulatif des normes harmonisées pertinentes de la directive Machine

1.4 AUTRES DIRECTIVES

D'autres directives sont également pertinentes vis-à-vis d'un système thermodynamique installé dans un ERP, à savoir :

- La directive « Basse tension » : 2014/35/UE.

EN 60335-2-40:2003	Household and similar electrical appliances – Safety – Part 2-40: Particular requirements for electrical heat pumps, air-conditioners and dehumidifiers IEC 60335-2-40:2002 (Modified)
--------------------	---

*Tableau 3. Récapitulatif des normes harmonisées pertinentes de la directive
Basse Tension*

- La directive « Compatibilité électromagnétique » : 2004/108/CE.

2. ARRETES PRINCIPAUX

2.1 ARRETE DU 23 JUIN 1978

Cet arrêté décrit les règles d'implantation (distance, résistance des matériaux aux flammes, ...) à mettre en œuvre pour des installations fixes destinées au chauffage et à l'alimentation en eau chaude sanitaire des bâtiments d'habitation, de bureaux ou recevant du public. Cet arrêté est d'ailleurs cité par l'article CH6 de l'arrêté du 25 juin 1980.

2.2 ARRETE DU 25 JUIN 1980

L'arrêté du 25 juin 1980 définit les dispositions générales du règlement de la sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public. En effet, les ERP sont soumis à des règles complémentaires en matière de sécurité, notamment vis-à-vis de la résistance au feu du bâtiment ou des équipements intérieurs.

Son chapitre V, intitulé « Chauffage, réfrigération, climatisation, conditionnement d'air et installation d'eau chaude sanitaire » regroupe l'ensemble des articles s'adressant spécifiquement aux installations de l'étude. On y trouve des articles relatifs aux règles d'implantation des installations, aux matériaux à privilégier selon leur résistance au feu, aux fluides frigorigènes à utiliser et à la ventilation. On portera une attention particulière à l'article CH 35 qui traite de la production, du transport et de l'utilisation du froid. Ce dernier pose les conditions de l'utilisation des fluides frigorigènes en fonction de leur caractéristique. A ce titre, les fluides non inflammables et dont l'effet toxique est minime (L1) et les fluides frigorigènes dont la toxicité est la caractéristique dominante (L2) sont autorisés dans les ERP sous certaines conditions, tandis que les fluides dont la caractéristique dominante est l'inflammabilité et le pouvoir explosif (L3) sont strictement interdits.

	1	2	3
L	Si fluide présent dans l'ERP : Compresseurs hermétiques Charge \leq Volume local x Limite pratique	Implantation à l'extérieur (salle des machines ou chaufferie) Système indirect Quantité totale de fluide \leq 150kg	Interdit

Tableau 4. Exigences relatives aux fluides issues de l'article CH35

Note : la présente étude vise à étudier la modification des règles de mise en œuvre des différentes catégories de fluide. Il n'est donc pas exclu que l'arrêté du 25 juin 1980 soit modifié. L'article CH35 présente également d'autres règles qui seront analysées dans le cadre de notre étude.

D'autres articles sont intéressants dans le cadre de notre étude car ils contiennent des règles potentiellement transposables aux installations visées dans notre étude :

- Les articles CH5 et CH6 concernent les appareils de production de chaleur ; certaines règles relatives aux chaufferies ou aux installations en extérieur pourront être exploitées dans le cadre de notre étude (isolement vis-à-vis des tiers, limitation des propagations des incendies...) ;
- On peut également considérer les articles GZ qui s'appliquent aux gaz combustibles et aux hydrocarbures. Ces articles dictent les règles à suivre en termes d'implantation et de dispositifs de sécurité (ventilation, détection, organes de coupure).

2.3 ARRETE DU 29 FEVRIER 2016

Cet arrêté relatif à certains fluides frigorigènes et aux gaz à effet de serre fluoré propose des règles sur le contrôle de l'étanchéité des équipements, sur la gestion des fluides en cas de cession ainsi que sur les modalités d'intervention.

2.4 ARRETE DU 15 DECEMBRE 2016

Cet arrêté encadre les inspections périodiques des systèmes de climatisation et des pompes à chaleur réversibles dont la puissance frigorifique est supérieure à 12 kilowatts. Il a vocation à inspecter le dimensionnement, le bon entretien et le rendement de l'appareil.

2.5 REGLEMENTATION ICPE

En fonction des caractéristiques de l'installation, cette dernière peut être soumise aux articles du Livre V du code de l'environnement relatifs aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Il serait envisageable d'analyser le contenu des textes relatifs aux installations contenant du GPL (rubrique 4718), de l'ammoniac (rubrique 4735) afin d'en extraire des règles pour les installations visées dans notre étude.

Néanmoins, dans la majorité des configurations, les quantités impliquées dans les installations resteraient inférieures aux seuils des rubriques concernées. Nous n'avons donc pas pris en compte à ce stade les réglementations ICPE. Etablissements Recevant du Public (ERP).

3. NORME NF EN 378

A la suite de la décision n°402752 du 28 juillet 2017, le conseil d'Etat rappelle la nécessité d'une norme d'être gratuitement accessible pour être d'application obligatoire. Dans la mesure où la norme NF EN 378 est payante, il n'est donc, dans aucun cas, requis de s'y conformer.

Cette dernière, relative aux systèmes frigorifiques et aux pompes à chaleur est une norme générique ou « horizontale » qui se distingue des normes spécifiques ayant une approche plus « verticale ». On peut donc distinguer, comme ci-dessous, des normes étroitement liées avec la NF EN 378.

- Normes génériques :

NF EN 378	Systèmes de réfrigération et pompes à chaleur
ISO 5149	Systèmes frigorifiques et pompes à chaleur – Exigences de sécurité et d'environnement

- Normes spécifiques

Produit	EN 60335-2-24	Machines à glaces
	EN 60335-2-40	Climatiseur
	EN 60335-2-89	Réfrigération commerciale
Composants	EN 14276	Equipements pour la pression
	EN 14624	Détecteurs
Fluides frigorifères	ISO 817	Sécurité et classification
	ISO/NP 19925	Mesures de vitesse de combustion

La norme NF EN 378 se découpe en quatre parties. La première présente les définitions et les exigences de bases que doivent satisfaire les systèmes thermodynamiques. Pour ce faire, elle différencie : Les ERP en fonction de leur type d'occupation et de leur catégorie d'accès ; Les structures d'équipement en fonction de leur catégorie de détente (directe, indirecte) ; Les fluides frigorifères selon leur toxicité et leur inflammabilité. Puis, selon les différentes situations considérées, elle propose des modes de calculs de la charge limite en fluide frigorifère que peut contenir un appareil.

Ensuite, la deuxième partie traite des préconisations de conception et de construction des appareils. Son objectif est de s'assurer que les équipements résistent correctement aux conditions de température, de pression et de vibration du process.

La partie trois, quant à elle, développe les règles d'installations proposées par la norme pour assurer la protection des personnes.

Finalement, la quatrième partie spécifie les exigences relatives au fonctionnement, à la maintenance, à la réparation des systèmes thermodynamiques. Elle traite également de la récupération et de la réutilisation des fluides frigorifères.

ANNEXE 3 : Analyse des Risques

1. PHASE DE VIE : INSTALLATION

Phénomène dangereux	Cause	Effets intermédiaires	Situation dangereuse	Risque	Mesures préventives	Mesures correctives
Défaillances techniques						
Fluide frigorigène	Défaut de conception	Soudure, tuyauterie endommagée	Fuite ou rupture de la tuyauterie	Incendie, explosion, personne intoxiquée, effet caustique sur la personne, gelure de la peau, asphyxie, panique, problème environnemental	<u>Général</u> Contraintes de conceptions, construction et installation : 378-2 : 6.2, 5.2 : étanchéité, étiquettes, informations... Epreuve : 378-2, 6.3 Soupape :378-2 : 5.1.2 <u>Espace occupé</u> Charge maximale en fonction de la norme 378-1 <u>Air libre</u> Vérifier l'étanchéité du bâtiment pour éviter l'écoulement et l'accumulation de réfrigérant <u>Local technique</u> Mesures de la norme 378-3	<u>Général</u> Port des EPI, formations aux risques Ventilation d'urgence Moyens d'extinction <u>Espace occupé</u> Evacuation du bâtiment en cas d'alarme <u>Air libre</u> Se tenir à l'écart de la fuite <u>Local technique</u> Réglementer l'accès au local, désigner des personnes comme responsables de l'intervention en cas d'alarme
	Défaut de soudure, joints, brides, vannes, clapets, instrumentations...					
	Fatigue de la tuyauterie	Rupture partielle de la tuyauterie ou de l'assemblage				
	Fuite vannes, bouchons ou soupape					
Défaillances humaines						
Fluide frigorigène	Manipulation erronée	Casse d'un raccord	Fuite, rupture	Incendie, explosion, personne intoxiquée, effet caustique sur la personne, gelure de la peau, asphyxie, panique, problème environnemental	Procédure, check-list Personnel qualifié et habilité par l'employeur Formation sur les risques incendies, chimie, de brûlure, pression... Aération Affichage, étiquette Contrôle des pression et température (PS,	<u>Général</u> Port des EPI, formations aux risques Ventilation d'urgence Moyens d'extinction <u>Espace occupé</u> Evacuation du bâtiment en cas d'alarme <u>Air libre</u>
	Raccordement des flexibles mal effectué	Fragilité de l'installation	Fuite, blessure par projection			
	Mauvais réglage des outils de contrôle	Dérive de la mesure, information erronée	Fuite ou rupture de la tuyauterie			
	Erreur de manipulation de	Charge	Destruction			

Phénomène dangereux	Cause	Effets intermédiaires	Situation dangereuse	Risque	Mesures préventives	Mesures correctives
	l'opérateur	excessive de fluide frigorigène	d'une partie de l'équipement et/ou fuite de fluide		TS) Procédure, check-list Personnel qualifié et habilité par l'employeur Formation sur les risques incendies, chimie, de brûlure, pression... Aération Affichage, étiquette	Se tenir à l'écart de la fuite <u>Local technique</u> Réglementer l'accès au local, désigner des personnes comme responsables de l'intervention en cas d'alarme
Agressions externes						
Fluide frigorigène	Chocs par engins		Fuite ou rupture de la tuyauterie	Incendie, explosion, personne intoxiquée, effet caustique sur la personne, gelure de la peau, asphyxie, panique, problème environnemental	Protection mécanique Procédure, check-list Personnel qualifié et habilité par l'employeur Formation sur les risques incendies, chimie, de brûlure, pression... Aération Affichage, étiquette	<u>Général</u> Port des EPI, formations aux risques Ventilation d'urgence Moyens d'extinction <u>Espace occupé</u> Evacuation du bâtiment en cas d'alarme <u>Air libre</u> Se tenir à l'écart de la fuite <u>Local technique</u> Réglementer l'accès au local, désigner des personnes comme responsables de l'intervention en cas d'alarme
	Chutes d'équipements du système (à l'installation, suite à surcharge, défaut des supportages, ...)					
Autres impacts externes						
Fluide frigorigène	Séisme, inondation, foudre...		Fuite ou rupture de la tuyauterie	Incendie, explosion, personne intoxiquée, effet caustique sur la personne, gelure de la peau, asphyxie, panique, problème environnemental	378-2 : 6.2, Conception et construction	<u>Général</u> Port des EPI, formations aux risques Ventilation d'urgence Moyens d'extinction <u>Espace occupé</u> Evacuation du bâtiment en cas
	Incendie des locaux				Ventilation d'urgence	

Phénomène dangereux	Cause	Effets intermédiaires	Situation dangereuse	Risque	Mesures préventives	Mesures correctives
					Murs coupe-feu Sprinkler Extincteur Rideau d'eau Soupape de sécurité Détecteur d'ambiance	d'alarme <u>Air libre</u> Se tenir à l'écart de la fuite <u>Local technique</u> Réglementer l'accès au local, désigner des personnes comme responsables de l'intervention en cas d'alarme
Risque électrique						
Energie électrique	Conception système frigorifique non conforme à la directive basse tension		Partie active exposée	Contact des personnes avec parties actives	Technicien formé aux risques électriques Mise en conformité : 2014/35UE et 2014/34/UE	Port des EPI Arrêt d'urgence
	Intervention humaine (non-respect des exigences de sécurité) ou défaillance d'un composant		Partie devenue active exposée	Contact des personnes avec des parties qui sont devenues actives à la suite d'une défaillance	Technicien formé aux risques électriques Procédure, check-list Personnel habilité et qualifié Etiquette et affichage	
	Court-circuit, surcharge		Rayonnement thermique	Blessure, incendie, explosion	378-2 : 6.2.9 (électrocution) 378-2 : 6.2.14 (scénarios qui amènent des incendies ou des explosions)	
			Projection de particules en fusion			
		Effet chimiques	Blessure, intoxication	Technicien formé aux risques électriques Etiquette de danger		
		Electrostatisme d'un composant	Incendie, explosion			

2. PHASE DE VIE : UTILISATION

Phénomène dangereux	Cause	Effets intermédiaires	Situation dangereuse	Risque	Mesures préventives	Mesures correctives
Surpression interne dans le circuit et énergie cinétique						
Fluide frigorigène (à pression non extrême)	Refroidissement inadéquat du condenseur	Augmentation de la pression de condensation	Fuite ou rupture de la tuyauterie	Incendie, explosion, personne intoxiquée, effet caustique sur la personne, gelure de la peau, asphyxie, panique, problème environnemental	Pressostat Soupape de sécurité Validation du dimensionnement par des calculs et des prototypes Prise en compte des contraintes externes (température ambiante, corrosion) Maintenance préventive contre les encrassements et obturations Conformité avec les normes conception et de construction : 378-2 5.2 et 6.2 Personnel qualifié et habilité par l'employeur Formation sur les risques incendies, chimie, de brûlure, pression...	<u>Général</u> Port des EPI, formations aux risques Ventilation d'urgence Moyens d'extinction <u>Espace occupé</u> Evacuation du bâtiment en cas d'alarme <u>Air libre</u> Se tenir à l'écart de la fuite <u>Local technique</u> Réglementer l'accès au local, désigner des personnes comme responsables de l'intervention en cas d'alarme
	Pression partielle de gaz non condensable					
	Accumulation d'huile dans le condenseur					
	Accumulation de fluide frigorigène en phase liquide dans le condenseur					
	Echauffement externe excessif (refroidisseur de liquide ou lors du dégivrage d'un refroidisseur d'air)	Augmentation de la pression de vapeur saturée				
	Température ambiante (système à l'arrêt)					
	Echangeur encrassé	Augmentation de la pression				
	Obturation du circuit					
	Dilatation thermique et hydrostatique du fluide frigorigène en phase liquide, dans un espace clos, causée par élévation de la température externe					
	Incendie dans la salle des machines					

Phénomène dangereux	Cause	Effets intermédiaires	Situation dangereuse	Risque	Mesures préventives	Mesures correctives
					Ventilation d'urgence Murs coupe-feu Sprinkler Extincteur Rideau d'eau Soupape de sécurité Détecteur d'ambiance	
Partie tournante dans la machine	Cf. Directive Machines et réglementations		Partie tournante, bruit, vibration	Blessure, perte de l'acuité auditive, dommages dus aux vibrations, coupure	378-2 : 6.2.11	Port des EPI Arrêt d'urgence
Pièces mécaniques en mouvement						
Effets directs phase liquide						
Fluide frigorigène en phase liquide	Erreur de manipulation de l'opérateur	Charge excessive de fluide frigorigène liquide ou équipement noyé par le fluide frigorigène	Destruction d'une partie de l'équipement et/ou fuite du fluide frigorigène	Incendie, explosion, personne intoxiquée, effet caustique sur la personne, gelure de la peau, asphyxie, panique, problème environnemental	Contrôle des pression et température (PS, TS) Procédure, check-list Personnel qualifié et habilité par l'employeur Formation sur les risques incendies, chimie, de brûlure, pression... Aération Affichage, étiquette Limitation de la variation de pression (ex : ouverture vanne) Eviter les démarrages répétés Brûlure : 378-2, 6.2.10	<u>Général</u> Port des EPI, formations aux risques Ventilation d'urgence Moyens d'extinction <u>Espace occupé</u> Evacuation du bâtiment en cas d'alarme <u>Air libre</u> Se tenir à l'écart de la fuite <u>Local technique</u> Réglementer l'accès au local, désigner des personnes responsables de
	Défaillance d'un composant					
	Siphonnage ou condensation dans le compresseur					
	Variation brusque de pression	Coup de bélier dans les tuyauteries	Fuite ou rupture de la tuyauterie			

Phénomène dangereux	Cause	Effets intermédiaires	Situation dangereuse	Risque	Mesures préventives	Mesures correctives
						l'intervention en cas d'alarme
	Émulsification de l'huile	Manque de lubrification	Système frigorifique défaillant, surchauffe	Brûlure		Port des EPI Arrêt d'urgence
Causes thermiques						
Fluide frigorigène	Fragilisation des matériaux sous basse température dans des conditions normales de fonctionnement		Fuite ou rupture de la tuyauterie	Incendie, explosion, personne intoxiquée, effet caustique sur la personne, gelure de la peau, asphyxie, panique, problème environnemental	Calorifuger les installations	<u>Général</u> Port des EPI, formations aux risques Ventilation d'urgence Moyens d'extinction <u>Espace occupé</u> Evacuation du bâtiment en cas d'alarme <u>Air libre</u> Se tenir à l'écart de la fuite <u>Local technique</u> Réglementer l'accès au local, désigner des personnes responsables de l'intervention en cas d'alarme
	Cause externe et/ou interne au système provoquant la baisse excessive de la température du fluide frigorigène	Fragilisation des matériaux sous basse température				
		Congélation de liquide caloporteur en espace clos générant l'expansion d'un volume en contact avec le fluide frigorigène : contamination de liquide de refroidissement (condenseur) ou caloporteur (évaporateur), et donc contamination possible du fluide caloporteur	Fuite, rupture (Dans des zones desservies si la classe d'installation est I, II)			
		Température de surface très faible	Refroidissement excessif d'une zone pouvant être touchée	Blessure suite à un contact avec la partie froide	Formation sur les risques de brûlure 378-2 : 6.2.10	Port de EPI
	Cause externe et/ou interne au système provoquant un gradient de température	Naissance de contraintes thermiques dans le matériau d'un composant	Fuite ou rupture de la tuyauterie		Incendie, explosion, personne intoxiquée, effet caustique sur la	Calorifuger les installations
Variations du volume dues aux variations de						

Phénomène dangereux	Cause	Effets intermédiaires	Situation dangereuse	Risque	Mesures préventives	Mesures correctives
		température		personne, gelure de la peau, asphyxie, panique, problème environnemental		<p>Moyens d'extinction</p> <p><u>Espace occupé</u></p> <p>Evacuation du bâtiment en cas d'alarme</p> <p><u>Air libre</u></p> <p>Se tenir à l'écart de la fuite</p> <p><u>Local technique</u></p> <p>Réglementer l'accès au local, désigner des personnes responsables de l'intervention en cas d'alarme</p>
	Cause externe et/ou interne au système provoquant la hausse excessive de la température du fluide frigorigène	Température de surface très haute	Réchauffement excessif d'une zone pouvant être touchée	Blessure suite à un contact avec la partie chaude		
Energie thermique (température haute ou basse)	Par conception, il existe des surfaces trop chaudes ou trop froides pouvant être touchées		Objets ou matériaux à des températures extrêmes pouvant être exposés	Brûlure, engelure et autres lésions	Formation sur les risques de brûlure 378-2 : 6.2.10	Port des EPI
	Présence d'une flamme (?)					
Défaillances techniques						
Fluide frigorigène	Fatigue, usure de la tuyauterie	Fragilisation (évaporateur, condenseur, réservoirs...) Fragilisation vannes, bouchons ou soupapes	Fuite ou rupture de la tuyauterie	Incendie, explosion, personne intoxiquée, effet caustique sur la personne, gelure de la peau, asphyxie, panique, problème	Vérifier le bon fonctionnement de la ventilation Effectuer des maintenances préventives à une fréquence suffisante pour empêcher les défaillances Poser/changer les bandes grasses anti-corrosion	<p><u>Général</u></p> <p>Port des EPI, formations aux risques</p> <p>Ventilation d'urgence</p> <p>Moyens d'extinction</p> <p><u>Espace occupé</u></p> <p>Evacuation du bâtiment</p>
	Corrosion interne ou externe					
	Vibrations					
	Défaut de soudure (joints, brides, vannes, instrumentations, clapets...)					
	Défaut métallurgique					

Phénomène dangereux	Cause	Effets intermédiaires	Situation dangereuse	Risque	Mesures préventives	Mesures correctives
	Grand froid ou canicule, gel sur les équipements	Fragilisation		environnemental	Protection antigel	<p>en cas d'alarme</p> <p><u>Air libre</u></p> <p>Se tenir à l'écart de la fuite</p> <p><u>Local technique</u></p> <p>Réglementer l'accès au local, désigner des personnes comme responsables de l'intervention en cas d'alarme</p>
Agressions externes ou impacts mécaniques						
Fluide frigorigène	Chocs par engins		Fuite ou rupture de la tuyauterie	Incendie, explosion, personne intoxiquée, effet caustique sur la personne, gelure de la peau, asphyxie, panique, problème environnemental	Protection mécanique Procédure, check-list Personnel qualifié et habilité par l'employeur Formation sur les risques incendies, chimie, de brûlure, pression... Aération Affichage, étiquette	<p><u>Général</u></p> <p>Port des EPI, formations aux risques</p> <p>Ventilation d'urgence</p> <p>Moyens d'extinction</p> <p><u>Espace occupé</u></p> <p>Evacuation du bâtiment en cas d'alarme</p> <p><u>Air libre</u></p> <p>Se tenir à l'écart de la fuite</p> <p><u>Local technique</u></p> <p>Réglementer l'accès au local, désigner des personnes comme responsables de l'intervention en cas d'alarme</p>
	Chutes d'équipements du système (à l'installation, suite à surcharge, défaut des supportages, ...)					
Autres impacts mécaniques						

Phénomène dangereux	Cause	Effets intermédiaires	Situation dangereuse	Risque	Mesures préventives	Mesures correctives
Fluide frigorigène	Séisme, inondation, foudre...		Fuite ou rupture de la tuyauterie	Incendie, explosion, personne intoxiquée, effet caustique sur la personne, gelure de la peau, asphyxie, panique, problème environnemental	378-2 : 6.2, Conception et construction	<u>Général</u> Port des EPI, formations aux risques Ventilation d'urgence Moyens d'extinction <u>Espace occupé</u> Evacuation du bâtiment en cas d'alarme <u>Air libre</u> Se tenir à l'écart de la fuite <u>Local technique</u> Réglementer l'accès au local, désigner des personnes comme responsables de l'intervention en cas d'alarme
	Incendie des locaux				Ventilation d'urgence Murs coupe-feu Sprinkler Extincteur Rideau d'eau Soupape de sécurité Détecteur d'ambiance	
Risque électrique						
Energie électrique	Conception système frigorifique non conforme à la directive basse tension		Partie active exposée	Contact des personnes avec parties actives	Technicien formé aux risques électriques Mise en conformité : 2014/35UE et 2014/34/UE	Port des EPI Arrêt d'urgence
	Intervention humaine (non-respect des exigences de sécurité) ou défaillance d'un composant		Partie devenue active exposée	Contact des personnes avec des parties qui sont devenues actives à la suite d'une défaillance	Technicien formé aux risques électriques Procédure, check-list Personnel habilité et qualifié Etiquette et affichage	
	Court-circuit, surcharge		Rayonnement thermique	Blessure, incendie, explosion	378-2 : 6.2.9 (électrocution)	
		Projection de particules en	378-2 : 6.2.14 (scénarios qui amènent des incendies ou des explosions)			

Phénomène dangereux	Cause	Effets intermédiaires	Situation dangereuse	Risque	Mesures préventives	Mesures correctives	
			fusion		Technicien formé aux risques électriques Etiquette de danger		
			Effet chimiques	Blessure, intoxication			
			Electrostatisme d'un composant	Incendie, explosion			

3. PHASE DE VIE : MAINTENANCE

Phénomène dangereux	Cause	Effets intermédiaires	Situation dangereuse	Risque	Mesures préventives	Mesures correctives
Défaillances humaines						
Fluide frigorigène	Casse d'un raccord, tronçonnage, perçage...		Fuite ou rupture de la tuyauterie	Incendie, explosion, personne intoxiquée, effet caustique sur la personne, gelure de la peau, asphyxie, panique, problème environnemental	Procédure, check-list Personnel qualifié et habilité par l'employeur Formation sur les risques incendies, chimie, de brûlure, pression... Aération Affichage, étiquette	<u>Général</u> Port des EPI, formations aux risques Ventilation d'urgence Moyens d'extinction <u>Espace occupé</u> Evacuation du bâtiment en cas d'alarme <u>Air libre</u> Se tenir à l'écart de la fuite <u>Local technique</u> Réglementer l'accès au local, désigner des personnes responsables de l'intervention en cas d'alarme
	Dégradation, d'un joint, d'une vanne, d'un clapet...		Fuite de la tuyauterie			
	Ouverture/fermeture d'une vanne		Fuite ou rupture de la tuyauterie			
	Raccordement des flexibles mal effectué		Fuite, blessure par projection			
	Mauvais réglage des outils de contrôle		Fuite ou rupture de la tuyauterie			
Fluide frigorigène en phase liquide	Charge excessive de fluide frigorigène		Destruction d'une partie de l'équipe et/ou fuite de fluide	Incendie, explosion, personne intoxiquée, effet caustique sur la personne, gelure de la peau, asphyxie, panique, problème environnemental	Contrôle des pression et température (PS, TS) Procédure, check-list Personnel qualifié et habilité par l'employeur Formation sur les risques incendies, chimie, de brûlure, pression... Aération Affichage, étiquette	<u>Général</u> Port des EPI, formations aux risques
	Remplissage/appoint avec le mauvais fluide frigorigène		Destruction d'une partie de l'équipe et/ou fuite de fluide			
	Non-respect des procédures		Destruction d'une partie de l'équipement et/ou fuite de fluide			
Suppression interne dans le circuit et énergie cinétique						
Fluide frigorigène à pression non	Refroidissement inadéquat du condenseur	Augmentation de la pression de condensation	Fuite ou rupture de la tuyauterie	Incendie, explosion, personne intoxiquée, effet caustique sur la personne,	Pressostat Soupape de sécurité	<u>Général</u> Port des EPI, formations aux risques
	Pression partielle de gaz non					

Phénomène dangereux	Cause	Effets intermédiaires	Situation dangereuse	Risque	Mesures préventives	Mesures correctives
extrême	condensable			gelure de la peau, asphyxie, panique, problème environnemental	Validation du dimensionnement par des calculs et des prototypes Prise en compte des contraintes externes (température ambiante, corrosion) Maintenance préventive contre les encrassements et obturations Conformité avec les normes conception et de construction : 378-2 5.2 et 6.2 Personnel qualifié et habilité par l'employeur Formation sur les risques incendies, chimie, de brûlure, pression...	Ventilation d'urgence Moyens d'extinction <u>Espace occupé</u> Evacuation du bâtiment en cas d'alarme <u>Air libre</u> Se tenir à l'écart de la fuite <u>Local technique</u> Réglementer l'accès au local, désigner des personnes comme responsables de l'intervention en cas d'alarme
	Accumulation d'huile dans le condenseur					
	Accumulation de fluide frigorigène en phase liquide dans le condenseur					
	Echauffement externe excessif (refroidisseur de liquide ou lors du dégivrage d'un refroidisseur d'air)	Augmentation de la pression de vapeur saturée				
	Température ambiante (système à l'arrêt)	Augmentation de la pression				
	Echangeur encrassé					
	Obturation du circuit					
	Dilatation thermique et hydrostatique du fluide frigorigène en phase liquide, dans un espace clos, causée par élévation de la température externe	Augmentation de la pression				
Incendie dans la salle des machines	Augmentation de la pression				Ne pas stocker de produit inflammable Ne pas installer d'équipements présentant un risque d'incendie Port des EPI Ventilation d'urgence Murs coupe-feu Sprinkler Extincteur Rideau d'eau Soupape de sécurité	

Phénomène dangereux	Cause	Effets intermédiaires	Situation dangereuse	Risque	Mesures préventives	Mesures correctives
					Détecteur d'ambiance	
Partie tournante dans la machine	Cf. Directive Machines et réglementations	Partie tournante, bruit, vibration	Blessure, perte de l'acuité auditive, dommages dus aux vibrations, coupure		378-2 : 6.2.11	Port des EPI Arrêt d'urgence
Pièces mécaniques en mouvement						
Effets directs phase liquide						
Fluide frigorigène en phase liquide	Défaillance d'un composant					<u>Général</u> Port des EPI, formations aux risques Ventilation d'urgence Moyens d'extinction <u>Espace occupé</u> Evacuation du bâtiment en cas d'alarme <u>Air libre</u> Se tenir à l'écart de la fuite <u>Local technique</u> Réglementer l'accès au local, désigner des personnes comme responsables de l'intervention en cas d'alarme
	Siphonnage ou condensation dans le compresseur					
	Variation brusque de pression	Coup de bélier dans les tuyauteries	Fuite ou rupture de la tuyauterie			
	Émulsification de l'huile	Manque de lubrification	Système frigorifique défaillant, surchauffe	Brûlure		Port des EPI
Causes thermiques						
Fluide	Fragilisation des matériaux sous basse température dans		Fuite ou rupture de la	Incendie, explosion, personne intoxiquée, effet	Calorifuger les installations	<u>Général</u>

Phénomène dangereux	Cause	Effets intermédiaires	Situation dangereuse	Risque	Mesures préventives	Mesures correctives
frigorigène	des conditions normales de fonctionnement		tuyauterie	caustique sur la personne, gelure de la peau, asphyxie, panique, problème environnemental		Port des EPI, formations aux risques Ventilation d'urgence Moyens d'extinction <u>Espace occupé</u> Evacuation du bâtiment en cas d'alarme <u>Air libre</u> Se tenir à l'écart de la fuite <u>Local technique</u> Réglementer l'accès au local, désigner des personnes comme responsables de l'intervention en cas d'alarme
	Cause externe et/ou interne au système provoquant la baisse excessive de la température du fluide frigorigène	Fragilisation des matériaux sous basse température				
		Congélation de liquide caloporteur en espace clos générant l'expansion d'un volume en contact avec le fluide frigorigène : contamination de liquide de refroidissement (condenseur) ou caloporteur (évaporateur), et donc contamination possible du fluide caloporteur	Fuite, rupture (Dans des zones desservies si la classe d'installation est I, II)			
		Température de surface très faible	Refroidissement excessif d'une zone pouvant être touchée	Blessure suite à un contact avec la partie froide	Formation sur les risques de brûlure 378-2 : 6.2.10	Port des EPI
Cause externe et/ou interne au système provoquant un gradient de température	Naissance de contraintes thermiques dans le matériau d'un composant		Fuite ou rupture de la tuyauterie	Incendie, explosion, personne intoxiquée, effet caustique sur la personne, gelure de la peau, asphyxie, panique, problème environnemental	Calorifuger les installations	<u>Général</u> Port des EPI, formations aux risques Ventilation d'urgence Moyens d'extinction <u>Espace occupé</u> Evacuation du bâtiment en cas d'alarme <u>Air libre</u> Se tenir à l'écart de la
	Variations du volume dues aux variations de température					

Phénomène dangereux	Cause	Effets intermédiaires	Situation dangereuse	Risque	Mesures préventives	Mesures correctives
						fuite <u>Local technique</u> Réglementer l'accès au local, désigner des personnes responsables de l'intervention en cas d'alarme
	Cause externe et/ou interne au système provoquant la hausse excessive de la température du fluide frigorigène	Température de surface très haute	Réchauffement excessif d'une zone pouvant être touchée	Blessure suite à un contact avec la partie chaude	Formation sur les risques de brûlure	Port des EPI
Energie thermique (température haute ou basse)	Par conception, il existe des surfaces trop chaudes ou trop froides pouvant être touchées		Objets ou matériaux à des températures extrêmes pouvant être exposés	Brûlure, engelure et aux lésions	378-2 : 6.2.10	
	Présence d'une flamme (?)					
Défaillances techniques						
Fluide frigorigène	Fatigue, usure de la tuyauterie	Fragilisation (évaporateur, condenseur, réservoirs...) Fragilisation vannes, bouchons ou soupapes	Fuite ou rupture de la tuyauterie	Incendie, explosion, personne intoxiquée, effet caustique sur la personne, gelure de la peau, asphyxie, panique, problème environnemental	Vérifier le bon fonctionnement de la ventilation Effectuer des maintenances préventives à une fréquence suffisante pour empêcher les défaillances Poser/changer les bandes grasses anti-corrosion Protection antigel	<u>Général</u> Port des EPI, formations aux risques Ventilation d'urgence Moyens d'extinction <u>Espace occupé</u> Evacuation du bâtiment en cas d'alarme <u>Air libre</u> Se tenir à l'écart de la fuite <u>Local technique</u> Réglementer l'accès au local, désigner des personnes comme
	Corrosion interne ou externe					
	Vibrations					
	Défaut de soudure (joints, brides, vannes, instrumentations, clapets...)					
	Défaut métallurgique					
	Grand froid ou canicule, gel sur les équipements	Fragilisation				

Phénomène dangereux	Cause	Effets intermédiaires	Situation dangereuse	Risque	Mesures préventives	Mesures correctives
						responsables de l'intervention en cas d'alarme
Agressions externes ou impacts mécaniques						
Fluide frigorigène	Chocs par engins		Fuite ou rupture de la tuyauterie	Incendie, explosion, personne intoxiquée, effet caustique sur la personne, gelure de la peau, asphyxie, panique, problème environnemental	Protection mécanique Procédure, check-list Personnel qualifié et habilité par l'employeur Formation sur les risques incendies, chimie, de brûlure, pression... Aération Affichage, étiquette	<u>Général</u> Port des EPI, formations aux risques Ventilation d'urgence Moyens d'extinction <u>Espace occupé</u> Evacuation du bâtiment en cas d'alarme <u>Air libre</u> Se tenir à l'écart de la fuite <u>Local technique</u> Réglementer l'accès au local, désigner des personnes comme responsables de l'intervention en cas d'alarme
	Chutes d'équipements du système (à l'installation, suite à surcharge, défaut des supportages, ...)					
Autres impacts mécaniques						
Fluide frigorigène	Séisme, inondation, foudre...		Fuite ou rupture de la tuyauterie	Incendie, explosion, personne intoxiquée, effet caustique sur la personne, gelure de la peau, asphyxie, panique, problème environnemental	378-2 : 6.2, Conception et construction	Port des EPI, formations aux risques
	Incendie des locaux				Ventilation d'urgence Murs coupe-feu Sprinkler Extincteur Rideau d'eau Soupape de sécurité Détecteur d'ambiance	Ventilation d'urgence Moyens d'extinction <u>Espace occupé</u> Evacuation du bâtiment en cas d'alarme <u>Air libre</u> Se tenir à l'écart de la fuite

Phénomène dangereux	Cause	Effets intermédiaires	Situation dangereuse	Risque	Mesures préventives	Mesures correctives
						<u>Local technique</u> Réglementer l'accès au local, désigner des personnes responsables de l'intervention en cas d'alarme
Risque électrique						
Energie électrique	Conception système frigorifique non conforme à la directive basse tension		Partie active exposée	Contact des personnes avec parties actives	Technicien formé aux risques électriques Mise en conformité : 2014/35UE et 2014/34/UE	Port des EPI Arrêt d'urgence
	Intervention humaine (non-respect des exigences de sécurité) ou défaillance d'un composant		Partie devenue active exposée	Contact des personnes avec des parties qui sont devenues actives à la suite d'une défaillance	Technicien formé aux risques électriques Procédure, check-list Personnel habilité et qualifié Etiquette et affichage	
	Court-circuit, surcharge		Rayonnement thermique	Blessure, incendie, explosion	378-2 : 6.2.9 (électrocution)	
			Projection de particules en fusion			
		Effet chimiques	Blessure, intoxication	Technicien formé aux risques électriques		
		Electrostatisme d'un composant	Incendie, explosion	Etiquette de danger		

4. PHASE DE VIE : INTERVENTION DES POMPIERS

Phénomène dangereux	Cause	Effets intermédiaires	Situation dangereuse	Risque	Mesures préventives	Mesures correctives
Impacts externes						
Fluide frigorigène	Incendie	Dégradation de boucle réfrigérant	Fuite ou rupture de la tuyauterie	Incendie, explosion, personne intoxiquée, effet caustique sur la personne, gelure de la peau, asphyxie, panique, problème environnemental	Ventilation d'urgence	Port des EPI, formations aux risques Ventilation d'urgence Moyens d'extinction
	Chocs sur la boucle				Murs coupe-feu	
	Chutes d'équipements du système (à l'installation, suite à surcharge, défaut des supportages, ...)				Sprinkler	
	Inondation	Extincteur				
		Dégradation de boucle réfrigérant			Rideau d'eau	
Extinction d'un incendie par arrosage	Pollution des eaux	Soupape de sécurité				
		Détection d'ambiance				
		Protection mécanique				
		Procédure, check-list				
		Formation sur les risques incendies, chimie, de brûlure, pression...				
		Aération				
		Affichage, étiquette				
			Personne intoxiquée, panique, épandage d'eaux polluées			Rétention, pompage et traitement des eaux
			Personne intoxiquée, panique, épandage d'eaux polluées			
Risque électrique						
Energie électrique	Conception système frigorifique non conforme à la directive basse tension		Partie active exposée	Contact des personnes avec parties actives	Mise en conformité : 2014/35UE et 2014/34/UE	Port des EPI
	Intervention humaine (non-		Partie devenue	Contact des personnes avec	Plan des installations à jour, OCG	Arrêt d'urgence

	respect des exigences de sécurité) ou défaillance d'un composant		active exposée	des parties qui sont devenues actives à la suite d'une défaillance	bien identifiés Plan de prévention à jour Etiquette et affichage	
	Court-circuit, surcharge		Rayonnement thermique	Blessure, incendie, explosion	378-2 : 6.2.9 (électrocution)	
		Projection de particules en fusion	378-2 : 6.2.14 (scénarios qui amènent des incendies ou des explosions)			
		Effet chimiques	Blessure, intoxication	Technicien formé aux risques électriques		
		Electrostatisme d'un composant	Incendie, explosion	Etiquette de danger		

ANNEXE 4 : Quantification des effets

1. QUELQUES RAPPELS PRELIMINAIRES

1.1 DESCRIPTION DE LA PHENOMENOLOGIE ATTENDUE

En cas de perte de confinement sur le circuit thermodynamique, l'ampleur et le comportement de la fuite va dépendre fortement de l'état physique du fluide contenu dans le composant défaillant. Dans les systèmes thermodynamiques étudiés ici, le fluide frigorigène se présente soit à l'état gazeux, soit à l'état de liquide sous pression, soit dans un état intermédiaire... donc diphasique. Comme le montre la *Figure 1*, les mécanismes physiques mis en jeu lors d'une fuite accidentelle diffèrent selon cet état initial :

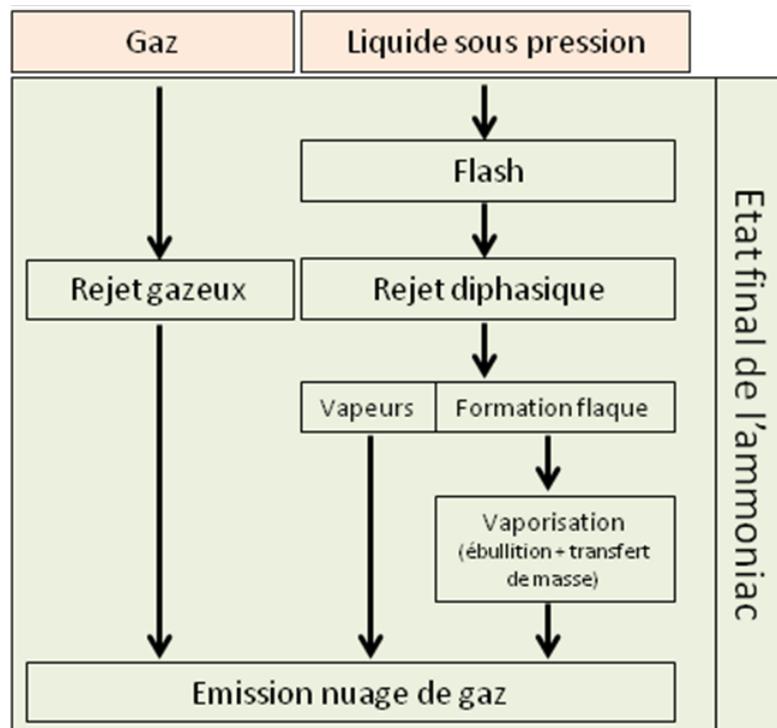


Figure 1. Mécanismes physiques mis en jeu lors d'une fuite

- Si la perte de confinement survient sur un composant contenant uniquement du gaz (sortie de l'évaporateur par exemple), la fuite sera donc 100% gazeuse et l'ensemble de l'inventaire rejeté participera à l'émission du nuage inflammable et/ou toxique.
- Si la perte de confinement survient sur un composant contenant un liquide sous pression (sortie de condenseur par exemple), la phénoménologie sera plus complexe (cf. *Figure 2*). Dans un premier temps, le liquide sous pression subit une détente brutale de sa pression de fonctionnement jusqu'à la pression atmosphérique. Cette détente s'accompagne d'une vaporisation partielle du fluide frigorigène (aussi appelée « flash ») qui entraîne la fragmentation du jet liquide en fines gouttelettes. La fuite est alors diphasique. Dans cette zone de détente, plus communément appelée zone d'expansion, aucune dilution n'est possible entre le jet diphasique et

l'air ambiant puisque la pression qui y règne est supérieure à la pression atmosphérique. S'ensuit alors la zone d'entraînement où la dilution devient possible. L'air entraîné dans le mélange diphasique va apporter ses calories pour vaporiser une partie des gouttelettes tandis qu'une autre partie de ces gouttelettes, sous l'action de leurs poids, va tomber au sol (= rain-out) pour former une flaque qui s'évapore. A noter que la cinétique d'évaporation va évoluer au cours du temps : d'abord très violente tant que le sol est suffisamment chaud (= ébullition) puis plus lente lorsque le sol est en équilibre thermique (= évaporation par transfert de masse). Dans le cas d'une fuite de liquide sous pression, le nuage inflammable et/ou toxique est alimenté par plusieurs contributions, chacune dotée de sa propre cinétique : le flash, l'évaporation des gouttelettes par entraînement de l'air ambiant et l'évaporation du rain-out formé au sol.

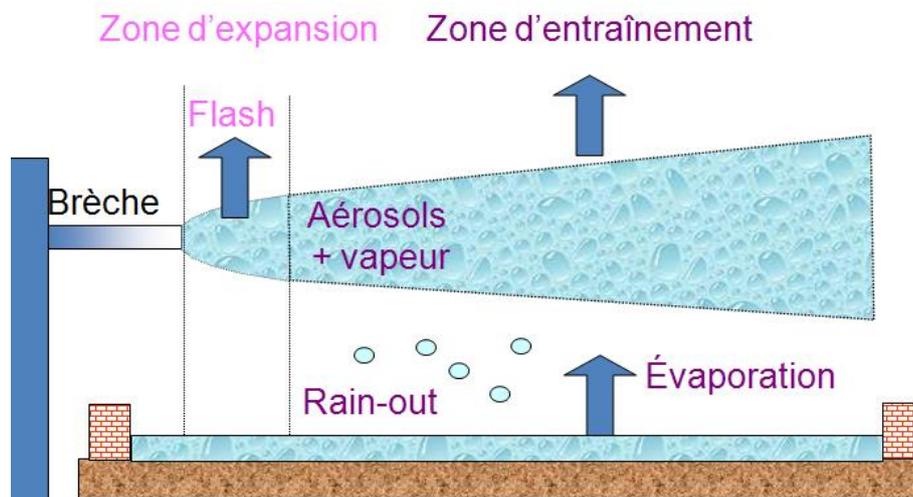


Figure 2. Phénoménologie associée à une fuite de liquide sous pression non-impactante

La présence d'un obstacle dans la fuite (mur du local, caisson du climatiseur...) aura une influence sur la formation du nuage uniquement si, au point d'impact, la fuite est encore constituée d'une quantité importante de gouttelettes en suspension. Cela ne concerne donc pas la fuite purement gazeuse ou la fuite diphasique dont la totalité des gouttelettes a eu le temps de se vaporiser ou de tomber au sol avant l'impact. Sur ce sujet, l'INERIS a mené plusieurs campagnes expérimentales et a pu constater que l'obstacle joue le même rôle que celui du sol sur le rain-out. Au début de la fuite, l'obstacle est à température ambiante et donc suffisamment chaud pour vaporiser les gouttelettes venant l'impacter. Mais, au fur et à mesure que la fuite se prolonge, l'obstacle chute en température et il devient de moins en moins capable de céder des calories aux gouttelettes. Ces dernières ruissellent alors le long de l'obstacle pour alimenter le rain-out formé au sol.

Principaux enseignements :

- Puisque la fuite se fait sous pression, il est probable que celle-ci soit audible si l'environnement n'est pas trop bruyant. L'intensité du bruit

(exprimé en dB) est généralement proportionnelle à la pression de fuite et au diamètre au carré de l'orifice de fuite ($\alpha D^2 \times P$)

- Dans le cas d'une fuite de liquide sous pression, du fait des échanges de chaleur entre les phases gazeuse et liquide dans la zone d'entraînement, la température dans le jet peut chuter tellement que l'humidité de l'air ambiant se condense. Dès lors, le nuage émis devient visible. En cas de fuite sur le circuit, survenant sur la phase liquide du fluide frigorigène, il est donc probable que la fuite soit visible. En fonction de l'ampleur de cette fuite et de sa localisation dans le bâtiment, il faut noter que l'évacuation de l'ERP peut être rendue difficile (perte de visibilité dans le bâtiment).
- Dans le cas d'une fuite de liquide sous pression, du fait de la présence de gouttelettes (= masse condensée) en son sein, la fuite aura plutôt tendance à avoir un comportement de gaz lourd et à ramper au sol.
- Toujours dans le cas d'une fuite liquide sous pression, et plus particulièrement si celle-ci survient dans un environnement fortement encombré, on peut s'attendre à la formation d'une flaque (ou « rain-out ») au sol. Plusieurs stratégies sont possibles pour gérer cette flaque :
 - Soit elle est canalisée « naturellement » vers une zone sûre,
 - Soit on la laisse s'évaporer (si aucun enjeu dans le champ proche)
 - Soit on met de la mousse sur la flaque. Point de vigilance : il ne faut pas diluer cette flaque avec de l'eau car cela peut revigorer la vaporisation de la flaque.
- La fuite purement gazeuse ne sera pas nécessairement visible. Elle ne sera pas non plus propice à la formation d'une flaque.

1.2 LISTING DES PHENOMENES DANGEREUX POSSIBLES EN CAS DE FUITE

En cas de fuite de fluide frigorigène, plusieurs Phénomènes Dangereux (PhD) sont susceptibles de se produire :

- Le VCE (ou Vapour Cloud Explosion) : cela concerne le rejet atmosphérique d'un produit inflammable qui, après s'être mélangé avec l'oxygène de l'air ambiant pour former un mélange inflammable, rencontre une source d'inflammation d'énergie suffisante. Dès lors, un front de flamme se propage dans les parties inflammables. Ce front de flamme, associé à l'expansion des gaz brûlés, agit à la manière d'un piston sur le mélange combustible environnant et peut-être à l'origine de la formation d'une onde de pression aérienne. Le vocabulaire distingue, selon les effets produits, le VCE du feu de nuage. De manière générale, le terme VCE s'applique lorsque des effets de pression sont observés alors que le terme de feu de nuage est réservé aux situations où la combustion du nuage ne produit pas d'effets de pression. Cependant, il s'agit dans les deux cas du même phénomène physique à savoir la combustion d'un mélange inflammable. Le lecteur intéressé pourra trouver plus d'informations dans le rapport Ω [INERIS, 2016].

- La fuite enflammée (ou feu torche) : ce phénomène prend naissance sous forme d'une flamme de diffusion lorsqu'un jet liquide ou gazeux issu d'une fuite accidentelle s'enflamme en rencontrant une source d'inflammation quelconque (par exemple, une surface chaude). Ce phénomène peut être à l'origine d'effets dominos importants. En effet, la flamme produite est susceptible d'impacter d'autres équipements présents dans la zone où se produit la fuite. Plus d'informations sur la fuite enflammée peuvent être obtenues dans le rapport Ω-8 de [INERIS, 2014].

Compte tenu de ces éléments, on peut dresser le *Tableau 1* :

PhD	Effets attendus	Classement du fluide frigorigène			
		A3	A2	A2L	A1
Feu torche	Thermique	Oui	Oui	Oui	Non
Feu de nuage	Thermique	Oui	Oui	Oui	Non
VCE	Surpression	Oui	Oui	Non ¹	Non
Dispersion	Toxique	A voir ²	A voir	A voir	A voir
	Anoxie	Oui	Oui	Oui	Oui

(a) Fluides frigorigènes classés A

Tableau 1. PhDs et effets attendus en fonction du classement

Si l'on se focalise maintenant sur le VCE, il convient de garder à l'esprit que ce phénomène dangereux peut survenir en plusieurs endroits selon la localisation du point de fuite.

- Dans la fuite elle-même. En effet, le fluide frigorigène étant à l'état pur dans le système frigorifique, sa concentration va donc varier de 100% v/v au point de fuite à 0 ppm dans le champ lointain. Inéluctablement, il y aura une zone où le champ de concentration sera dans la plage d'explosivité. En cas d'inflammation, on aura alors un VCE dans le jet.
- Dans le local. En effet, si la fuite survient dans un local, et que ce dernier n'est pas bien ventilé, le réfrigérant pourra s'accumuler dans le local et former de nouveau un mélange inflammable. Compte tenu du comportement de gaz lourd de la fuite, ce mélange inflammable sera plutôt présent en partie basse de l'ERP.

¹ Pour des vitesses laminaires de propagation de flamme inférieures à 10 cm/s, l'INERIS a l'habitude de considérer que l'explosion ne génère pas d'effets de surpression (d'où l'absence de VCE) mais des effets thermiques sont possibles du fait du feu de nuage.

² Les fluides classés A ont une toxicité dite « faible » (OEL < 400 ppm). Pour autant, cela ne veut pas dire qu'ils ne sont pas toxiques. Dès lors, à ce stade, il est impossible d'exclure tout risque de toxicité lié à l'utilisation de ces fluides.

De cette discussion, on retient que :

- Le VCE dans le jet est à considérer pour toute fuite accidentelle.
- Le VCE dans la nappe de gaz est à considérer uniquement si la fuite accidentelle a lieu en intérieur.

2. METHODOLOGIE DE QUANTIFICATION DES EFFETS

Compte tenu de la diversité des équipements visés par l'étude, la quantification des effets a été réalisée de façon paramétrique à savoir que les conséquences d'une fuite ont été évaluées :

- Par classe de fluides frigorigènes. Pour chaque classe, l'INERIS a cherché à identifier le fluide frigorigène, appartenant à cette classe, et qui aurait les effets les plus pénalisants en cas de phénomènes dangereux. En effet, le nombre actuel de fluides existants est tellement important qu'il n'était pas possible à l'INERIS de faire une évaluation spécifique à chaque fluide. De plus, en raisonnant sur le fluide majorant de chaque classe, il sera possible de dérouler plus aisément des règles d'installation dès lors que le classement de tout nouveau fluide frigorigène sur le marché sera connu.
- Pour un diamètre de fuite variant entre 0,05 et 40 mm. En effet, nos échanges avec les professionnels du secteur ont montré que le diamètre des tuyauteries était de l'ordre de 5 – 10 mm pour le circuit BP (évaporateur) et de 10 – 40 mm pour le circuit HP (condenseur). Or l'INERIS souhaite évaluer les conséquences d'une rupture guillotine (100% du Diamètre Nominal – DN), d'une fuite moyenne (10% du DN) et d'une fuite de type corrosion (1% du DN).
- Pour 3 températures du fluide frigorigène dans le circuit thermodynamique : +40°, +5°C et -30°C. Comme la pression dans le circuit est directement liée à cette température via la pression de vapeur saturante du fluide frigorigène en question, on fera référence à ces trois points de fonctionnement comme étant respectivement les points HP (Haute Pression), MP (Moyenne Pression) et BP (Basse Pression). A noter que certains fluides frigorigènes ont une température d'ébullition pas suffisamment faible pour permettre une évaluation des conséquences d'une fuite BP voire MP (cas par exemple du pentane).

Par souci de simplicité, toutes les modélisations ont été effectuées à l'aide du code de type intégral : PHAST v6.54. Ce code est particulièrement adapté pour notre étude car il intègre plusieurs modèles :

- Un premier modèle de jet qui s'intéresse à la phase initiale de dispersion du nuage, souvent dominée par l'inertie du jet en sortie de brèche,
- Un second modèle prenant en compte les effets de flottabilité ou gravité sur la dispersion du nuage lorsque celle-ci n'est plus dominée par l'inertie du jet,
- Et un troisième modèle gaussien appliqué à la phase finale de la dispersion.

En revanche, dans le contexte de la présente étude, la principale limite du code est que celui-ci considère que la dispersion s'effectue sur un sol plat. Par conséquent, le nuage ne doit pas rencontrer d'obstacles importants lors de son parcours. Cette limite peut être vite atteinte lors d'une fuite d'un climatiseur dans un magasin encombré de rayonnages. Le recours serait alors d'utiliser un code

CFD (« Computational Fluid Dynamics » ou code tridimensionnel) mais le contexte de l'étude ne permet pas de mettre en œuvre un tel code dont la mise en œuvre est spécifique à chaque scénario étudié et, par conséquent, peut être assez coûteux en moyens humains et en ressources informatiques. L'utilisation du code PHAST paraît être l'approche la plus adaptée.

Comme ces modélisations concernent des scénarii pouvant survenir aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur d'un ERP, celles-ci ont été effectuées pour une condition météorologique G1 (atmosphère très stable avec une vitesse de vent de 1 m/s à 10 m de haut). On ne s'attend pas à ce que cette condition météorologique ait une réelle influence sur la dispersion dans les premiers mètres de la fuite.

3. DETERMINATION DES EFFETS

3.1 EFFETS THERMIQUES LIES A UN FEU TORCHE

Pour les effets thermiques liés à un feu torche, l'INERIS s'est appuyé sur les résultats du code PHAST pour l'évolution du flux radiatif en fonction de la distance par rapport à l'enveloppe de la flamme.

Les distances d'effets réglementaires ont été déterminées pour un flux de :

- 3 kW/m² pour le Seuil des Effets Irréversibles (SEI),
- 5 kW/m² pour le Seuil des premiers Effets Létaux (SEL),
- 8 kW/m² pour le Seuil des Effets Létaux Significatifs (SELS).

3.2 EFFETS THERMIQUES LIES A UN FEU DE NUAGE

Pour les effets thermiques liés à un feu de nuage, l'INERIS s'est appuyé sur les résultats du code PHAST pour la distance longitudinale à la Limite Inférieure d'Explosivité (LIE) du produit concerné.

Conformément à ce qui est indiqué dans la Circulaire du 10 mai 2010³, les distances d'effets réglementaires ont été déterminées à :

- LIE pour les SEL et SELS
- 110% LIE pour le SEI

3.3 EFFETS DE SURPRESSION LIES A UN VCE

Pour les effets de surpression liés à un VCE, l'INERIS s'est appuyé sur les résultats du code PHAST pour le champ de concentration prédit en aval du point de fuite. La méthode a consisté à (1) déterminer le volume de la plus grosse sphère inscrite dans le nuage inflammable tel que prédit par le code, (2) à déterminer la masse inflammable présente dans cette sphère en considérant que le mélange est à la stœchiométrie, (3) à calculer l'énergie maximale disponible en cas d'inflammation de cette masse et (4) à déterminer les distances d'effets SEI, SEL et SELS en utilisant la méthode Multi-Energie. Pour appliquer cette méthode, il est nécessaire de fixer un indice de violence pour l'explosion (chiffre allant de 1 – surpression maximale de 10 mbar – à 10 – surpression maximale de 10 bar). Compte tenu des produits inflammables visés par cette étude et des conditions de fuite éventuelle (milieu parfois encombré), l'INERIS a utilisé un indice de violence de 6 (surpression maximale de 500 mbar).

Les distances d'effets réglementaires ont été déterminées pour un seuil de surpression de :

³ Circulaire du 10/05/10 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003.

- 20 mbar pour les bris de vitre,
- 50 mbar pour le SEI,
- 140 mbar pour le SEL,
- 200 mbar pour le SELS.

4. PRESENTATION DES RESULTATS OBTENUS

Dans ce qui suit, il est discuté :

- Le risque d'anoxie (cf. §4.1).
- Les risques liés à l'inflammation d'une fuite de fluide frigorigène (cf. §4.2 et 4.3).
- Le risque de formation d'une nappe de gaz inflammable (cf. 4.4).

4.1 RISQUE D'ANOXIE LIES A UNE FUITE DE FLUIDE FRIGORIGENE

Pour rappel, le risque d'anoxie est dû à une teneur trop faible en oxygène (O₂) dans un espace confiné pouvant résulter, dans le contexte de la présente étude, du remplacement de l'oxygène par un autre gaz lors d'une fuite accidentelle.

Ce risque d'anoxie n'est pas spécifique à la nature du fluide frigorigène utilisé. Il existe déjà avec les fluides de classe A1. Il n'y a donc pas de surrisque à utiliser les autres classes de fluide.

Enfin, il convient de rappeler que les seuils SEI et SEL (= SELS) sont de 18% et 11% v/v en O₂. Pour que la concentration en oxygène chute à des valeurs aussi basses, cela signifie que la concentration du gaz fuyant, qui peut être un fluide inflammable ou toxique, atteint des valeurs élevées. Par conséquent, même s'il ne doit surtout pas être ignoré, le risque d'anoxie devient moins critique par comparaison avec les risques d'inflammabilité et de toxicité présentés par les fluides des classes autres que A1.

4.2 RISQUES LIES A L'INFLAMMATION D'UNE FUITE DE FLUIDE FRIGORIGENE

De façon prudente, il est supposé ici que :

- Le rejet se fait horizontalement, à une hauteur d'homme (soit à la hauteur d'homme) et librement (sans impact sur des éléments externes).
- Le rejet se fait au débit maximal. On ne tient pas compte d'une diminution de la pression à l'intérieur du circuit se traduisant par une baisse du débit.
- La perte de confinement se fait sur la phase liquide du gaz sous pression. Le rejet est donc diphasique.

Les modélisations ont été effectuées pour :

- Deux fluides de classe A3 : pentane (R601) et propane (R290)
- Un fluide de classe A2 : difluoroéthane (R152a)
- Un fluide de classe A2L : difluorométhane (R32)

4.2.1 FLUIDE DE CATEGORIE A3 : PENTANE ET PROPANE

4.2.1.1 RESULTATS OBTENUS AVEC LE PENTANE (HP)

Les fuites en MP et BP ne sont pas modélisées car, aux températures respectives de 5 et -30°C, le pentane est à la pression subatmosphérique. En théorie, si ces deux points de fonctionnement existent réellement sur le système thermodynamique, toute perte de confinement sur le circuit se traduit, non pas par un rejet de pentane, mais par une ingestion d'air environnant dans le circuit.

Pour le pentane, il n'existe pas de seuils de toxicité aiguë françaises (VSTAF).

Le Tableau 2 présente les caractéristiques de la fuite telle que prédite par le code PHAST v6.54. Il convient de préciser que D_{LIE} et R_{LIE} correspondent aux distances à la LIE respectivement dans l'axe du jet et transversalement au jet.

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
Débit [g/s]	< 0,1	< 0,1	2,1	51,6	356,6	1539,3
D_{LIE} [m]	< 0,1	0,1	1,1	3,0	36	85
R_{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,2	0,2	0,2

Tableau 2. Caractéristiques de la fuite de pentane en HP (40°C)

NB : si la fuite ne se fait pas sur la phase liquide sous pression mais gazeuse, les données du tableau précédent deviennent :

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
Débit [g/s]	< 0,1	< 0,1	0,1	3,5	54,9	223,9
D_{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	0,1	1,0	4,5	8,5
R_{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,2	0,4

Tableau 3. Caractéristiques de la fuite gazeuse de pentane en HP (40°C)

4.2.1.1.1 EFFETS LIES A UN FEU TORCHE

Les effets thermiques liés au feu torche ont été étudiés à l'aide du logiciel PHAST v6.54 :

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
SEI [m]	NA	NA	NA	10	24,0	45,0
SEL [m]	NA	NA	NA	8,5	21,0	40,0
SELS [m]	NA	NA	NA	7,5	19,0	36,0

Tableau 4. Effets liés à un feu torche pour une fuite de pentane en HP (40°C)

4.2.1.1.2 EFFETS LIÉS AU FEU DE NUAGE

Les effets thermiques liés au feu de nuage ont été déterminés conformément

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
SEI [m]	6,9	0,1	1,2	3,3	40	94
SEL [m]	< 0,1	0,1	1,1	3,0	36	85
SELS [m]						

Tableau 5. Effets liés à un feu de nuage pour une fuite de pentane en HP (40°C)

4.2.1.1.2.1 EFFETS LIÉS A UN VCE

Les effets de surpression liés à un VCE ont été étudiés à l'aide de la méthode Multi-Energie (indice = 6) :

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
V _{infl} [m ³]	0,000	0,000	0,001	0,034	0,048	0,048
E [MJ]	1,8 ^e -6	1,2 ^e -4	1,8 ^e -3	0,1	0,2	0,2
Bris [m]	0,3	1,1	3,3	13,0	28,5	67,5
SEI [m]	0,1	0,5	2,0	7,5	22,0	61,0
SEL [m]	< 0,1	0,2	1,2	4,0	18,5	57,5
SELS [m]	< 0,1	0,2	1,0	3,5	18,0	57,0

Tableau 6. Effets liés à un VCE pour une fuite de pentane en HP (40°C)

4.2.1.1.3 SYNTHÈSE DES RESULTATS AVEC LE PENTANE

La *Figure 3* présente la synthèse des résultats dans le cas d'une fuite libre de pentane.

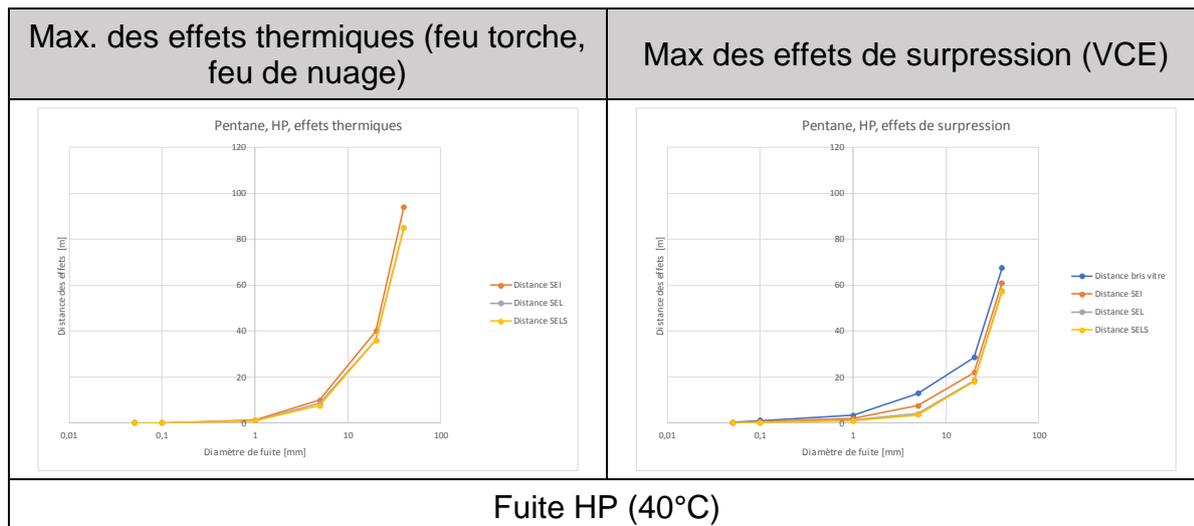


Figure 3. Fuite de pentane (R601)

4.2.1.2 RESULTATS OBTENUS AVEC LE PROPANE (HP, MP ET BP)

Pour le propane, il n'existe pas de VSTAF.

Les tableaux suivants présentent les caractéristiques de la fuite telle que prédite par le code PHAST v6.54. Il convient de préciser que D_{LIE} et R_{LIE} correspondent aux distances à la LIE respectivement dans l'axe du jet et transversalement au jet.

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
Débit [g/s]	< 0,1	0,2	17,2	430,2	2254,9	10072,6
D_{LIE} [m]	< 0,1	0,1	1,8	9,0	19,5	47,0
R_{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	0,1	0,3	0,9	1,6

Tableau 7. Caractéristiques de la fuite de propane en HP (40°C)

NB : si la fuite ne se fait pas sur la phase liquide sous pression mais gazeuse, les données du tableau précédent deviennent :

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
Débit [g/s]	< 0,1	< 0,1	2,7	67,3	1005,1	4305,8
D_{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	0,5	2,5	9,5	18,0
R_{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,4	0,8

Tableau 8. Caractéristiques de la fuite gazeuse de propane en HP (40°C)

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
Débit [g/s]	< 0,1	0,1	10,6	265,0	1244,3	5501,7
D _{LIE} [m]	< 0,1	0,1	1,8	8,5	19,0	46,0
R _{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	0,1	0,4	0,8	1,2

Tableau 9. Caractéristiques de la fuite de propane en MP (5°C)

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
Débit [g/s]	< 0,1	< 0,1	4,2	105,4	533,1	2322,7
D _{LIE} [m]	< 0,1	0,2	1,8	8,0	27,0	61,0
R _{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	0,1	0,3	0,4	0,6

Tableau 10. Caractéristiques de la fuite de propane en BP (-30°C)

4.2.1.2.1 EFFETS LIES A UN FEU TORCHE

Les effets thermiques liés au feu torche ont été étudiés à l'aide du logiciel PHAST v6.54 :

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
SEI [m]	NA	NA	3,6	18,5	39,5	78,5
SEL [m]	NA	NA	2,8	16,5	35,5	70
SELS [m]	NA	NA	NA	15	32,5	64,5

Tableau 11. Effets liés à un feu torche pour une fuite de propane en HP (40°C)

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
SEI [m]	NA	NA	3,0	16,5	33,5	66,0
SEL [m]	NA	NA	2,0	14,5	30,0	59,0
SELS [m]	NA	NA	NA	13,5	27,5	54,0

Tableau 12. Effets liés à un feu torche pour une fuite de propane en MP (5°C)

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
SEI [m]	NA	NA	NA	13,0	27,0	52,5
SEL [m]	NA	NA	NA	11,5	24,5	47,0
SELS [m]	NA	NA	NA	10,5	22,5	43,0

Tableau 13. Effets liés à un feu torche pour une fuite de propane en BP (-30°C)

4.2.1.2.2 EFFETS LIES AU FEU DE NUAGE

Les effets thermiques liés au feu de nuage ont été déterminés conformément

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
SEI [m]	< 0,1	0,1	2,0	10,0	21,5	52,0
SEL [m]	< 0,1	< 0,1	1,8	9,0	19,5	47,0
SELS [m]						

Tableau 14. Effets liés à un feu de nuage pour une fuite de propane en HP (40°C)

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
SEI [m]	< 0,1	0,1	2,0	9,5	21,0	51,0
SEL [m]	< 0,1	< 0,1	1,8	8,5	19,0	46,0
SELS [m]						

Tableau 15. Effets liés à un feu de nuage pour une fuite de propane en MP (5°C)

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
SEI [m]	< 0,1	0,2	2,0	9,0	30,0	67,0
SEL [m]	< 0,1	0,2	1,8	8,0	27,0	61,0
SELS [m]						

Tableau 16. Effets liés à un feu de nuage pour une fuite de propane en BP (-30°C)

4.2.1.2.3 EFFETS LIES A UN VCE

Les effets de surpression liés à un VCE ont été étudiés à l'aide de la méthode Multi-Energie (indice = 6) :

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
V _{infil} [m ³]	0,000	0,000	0,001	0,144	2,572	15,600
E [MJ]	1,9 ^e -6	1,5 ^e -4	5,3 ^e -3	0,53	9,4	57,1
Bris [m]	0,3	0,6	5,0	23,0	60,0	112,5
SEI [m]	0,1	0,3	3,0	14,0	36,5	70,0
SEL [m]	< 0,1	0,1	1,8	9,0	23,0	45,0
SELS [m]	< 0,1	0,1	1,6	8,0	20,5	40,5

Tableau 17. Effets liés à un VCE pour une fuite de propane en HP (40°C)

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
V _{infl} [m ³]	0,000	0,000	0,001	0,180	1,767	7,238
E [MJ]	1,9 ^e -6	1,2 ^e -4	5,3 ^e -3	0,7	6,5	26,5
Bris [m]	0,3	1,1	5,0	24,5	55,5	90,0
SEI [m]	0,1	0,6	3,0	14,5	34,5	57,0
SEL [m]	< 0,1	0,2	1,8	9,0	23,0	38,0
SELS [m]	< 0,1	0,2	1,6	8,0	20,5	34,5

Tableau 18. Effets liés à un VCE pour une fuite de propane en MP (5°C)

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
V _{infl} [m ³]	0,000	0,000	0,003	0,087	0,221	1,023
E [MJ]	1,9 ^e -6	1,2 ^e -4	9,4 ^e -3	0,3	0,8	3,7
Bris [m]	0,3	1,1	6,0	22,5	38,0	64,5
SEI [m]	0,1	0,6	3,5	14,5	27,5	47,5
SEL [m]	< 0,1	0,2	2,5	10,5	21,5	37,5
SELS [m]	< 0,1	0,2	2,0	9,5	20,5	35,5

Tableau 19. Effets liés à un VCE pour une fuite de propane en BP (-30°C)

4.2.1.2.4 SYNTHÈSE DES RESULTATS AVEC LE PENTANE

La *Figure 4* présente la synthèse des résultats dans le cas d'une fuite libre de propane.

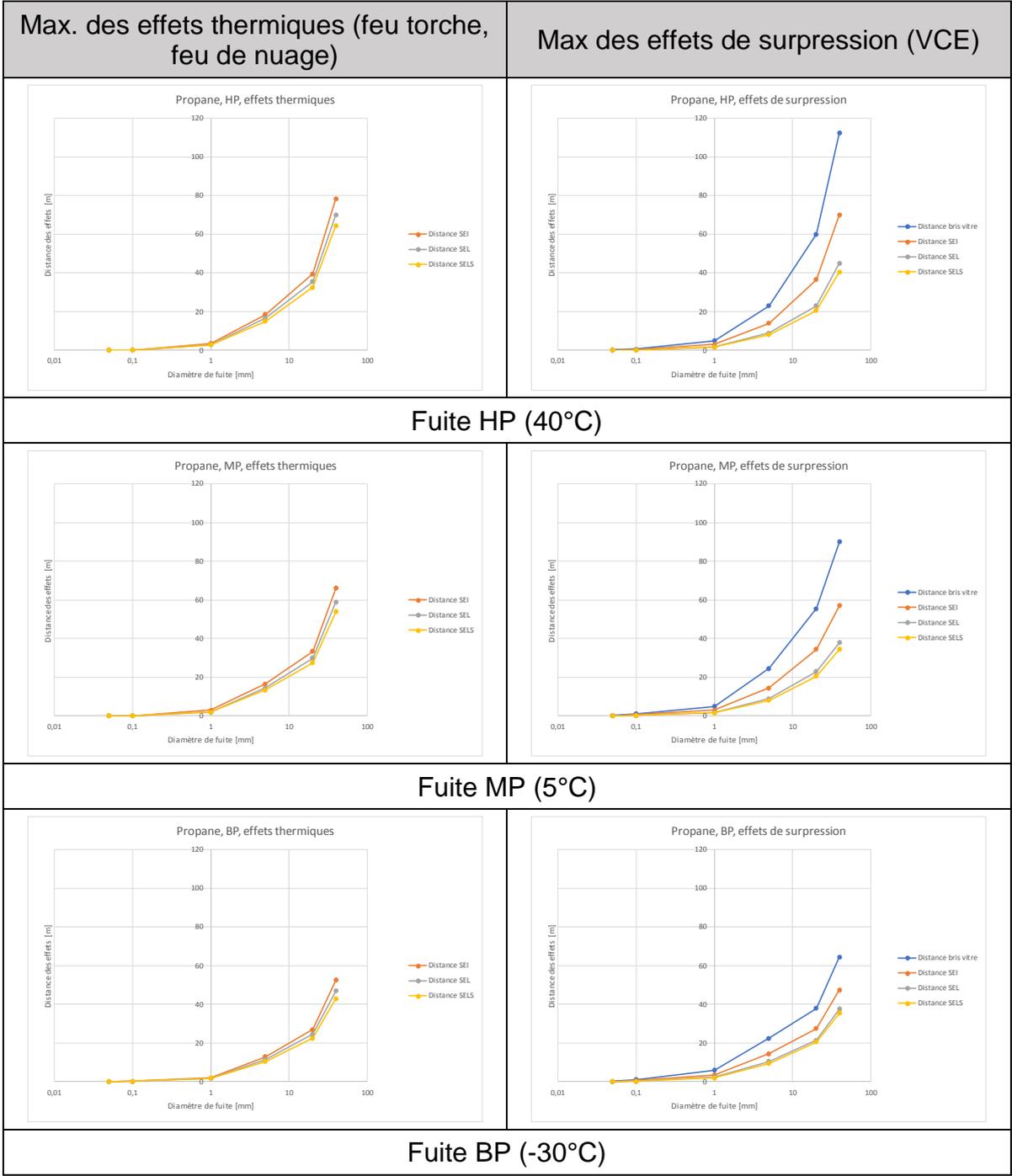


Figure 4. Fuite de propane (R290)

4.2.2 FLUIDE DE CATEGORIE A2 : DIFLUOROETHANE

4.2.2.1 RESULTATS OBTENUS AVEC LE DIFLUOROETHANE (HP ET MP)

La fuite en BP n'est pas modélisée car, à la température de -30°C, le difluoroéthane est à la pression subatmosphérique. En théorie, si ce point de fonctionnement existe réellement sur le système thermodynamique, toute perte de confinement sur le circuit se traduit, non pas par un rejet de difluoroéthane, mais par une ingestion d'air environnant dans le circuit.

Pour le difluoroéthane, il n'existe pas de VSTAF.

Dans une démarche résolument prudente, la chaleur de combustion du difluoroéthane a été prise égale à 19 MJ/kg correspondant au seuil au-delà duquel tout fluide frigorigène inflammable passe de la classe A2 à A3.

Les tableaux suivants présentent les caractéristiques de la fuite telle que prédite par le code PHAST v6.54. Il convient de préciser que D_{LIE} et R_{LIE} correspondent aux distances à la LIE respectivement dans l'axe du jet et transversalement au jet.

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
Débit [g/s]	< 0,1	0,2	19,7	493,8	2034,1	8878,4
D_{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	0,6	3,2	6,7	13,5
R_{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,3	0,5

Tableau 20. Caractéristiques de la fuite de difluoroéthane en HP (40°C)

NB : si la fuite ne se fait pas sur la phase liquide sous pression mais gazeuse, les données du tableau précédent deviennent :

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
Débit [g/s]	< 0,1	< 0,1	2,1	52,7	791,5	3371,2
D_{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	0,1	1,0	3,5	7,0
R_{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,3

Tableau 21. Caractéristiques de la fuite de difluoroéthane gazeux en HP (40°C)

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
Débit [g/s]	< 0,1	0,1	10,7	268,4	966,6	4142,1
D_{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	0,6	3,4	6,5	13,0
R_{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,2	0,5

Tableau 22. Caractéristiques de la fuite de difluoroéthane en MP (5°C)

4.2.2.1.1 EFFETS LIÉS A UN FEU TORCHE

Les effets thermiques liés au feu torche ont été étudiés à l'aide du logiciel PHAST v6.54 :

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
SEI [m]	NA	NA	3,6	18,0	35,0	68,5
SEL [m]	NA	NA	2,8	16,5	31,5	61,0
SELS [m]	NA	NA	NA	15,0	29,0	56,0

Tableau 23. Effets liés à un feu torche pour une fuite de difluoroéthane en HP (40°C)

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
SEI [m]	NA	NA	2,7	15,5	28,0	53,5
SEL [m]	NA	NA	1,5	13,5	25,0	48,0
SELS [m]	NA	NA	NA	12,5	23,0	44,0

Tableau 24. Effets liés à un feu torche pour une fuite de difluoroéthane en MP (5°C)

4.2.2.1.2 EFFETS LIÉS AU FEU DE NUAGE

Les effets thermiques liés au feu de nuage ont été déterminés conformément

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
SEI [m]	< 0,1	< 0,1	0,7	3,5	7,4	15,0
SEL [m]	< 0,1	< 0,1	0,6	3,2	6,7	13,5
SELS [m]						

Tableau 25. Effets liés à un feu de nuage pour une fuite de difluoroéthane en HP (40°C)

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
SEI [m]	< 0,1	< 0,1	0,7	3,7	7,5	14,5
SEL [m]	< 0,1	< 0,1	0,6	3,4	6,5	13,0
SELS [m]						

Tableau 26. Effets liés à un feu de nuage pour une fuite de difluoroéthane en MP (5°C)

4.2.2.1.3 EFFETS LIÉS A UN VCE

Les effets de surpression liés à un VCE ont été étudiés à l'aide de la méthode Multi-Energie (indice = 6) :

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
V _{infl} [m ³]	0,000	0,000	0,000	0,007	0,065	0,606
E [MJ]	1,1 ^{e-6}	1,1 ^{e-6}	1,4 ^{e-4}	2 ^{e-2}	0,14	1,3
Bris [m]	0,2	0,2	1,4	8,0	16,5	34,0
SEI [m]	0,1	0,1	0,9	5,0	11,0	22,0
SEL [m]	< 0,1	< 0,1	0,5	3,5	7,5	15,0
SELS [m]	< 0,1	< 0,1	0,5	3,0	7,0	14,0

Tableau 27. Effets liés à un VCE pour une fuite de difluoroéthane en HP (40°C)

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
V _{infl} [m ³]	0,000	0,000	0,000	0,007	0,051	0,382
E [MJ]	1,1 ^{e-6}	1,1 ^{e-6}	1,4 ^{e-4}	7,9 ^{e-4}	0,11	0,80
Bris [m]	0,2	0,2	1,4	8,5	15,0	30,0
SEI [m]	0,1	0,1	0,9	5,5	10,0	20,0
SEL [m]	< 0,1	< 0,1	0,5	4,0	7,0	14,0
SELS [m]	< 0,1	< 0,1	0,5	3,5	6,5	13,0

Tableau 28. Effets liés à un VCE pour une fuite de difluoroéthane en MP (5°C)

4.2.2.1.4 SYNTHÈSE DES RESULTATS AVEC LE DIFLUOROETHANE

La *Figure 5* présente la synthèse des résultats dans le cas d'une fuite libre de difluoroéthane.

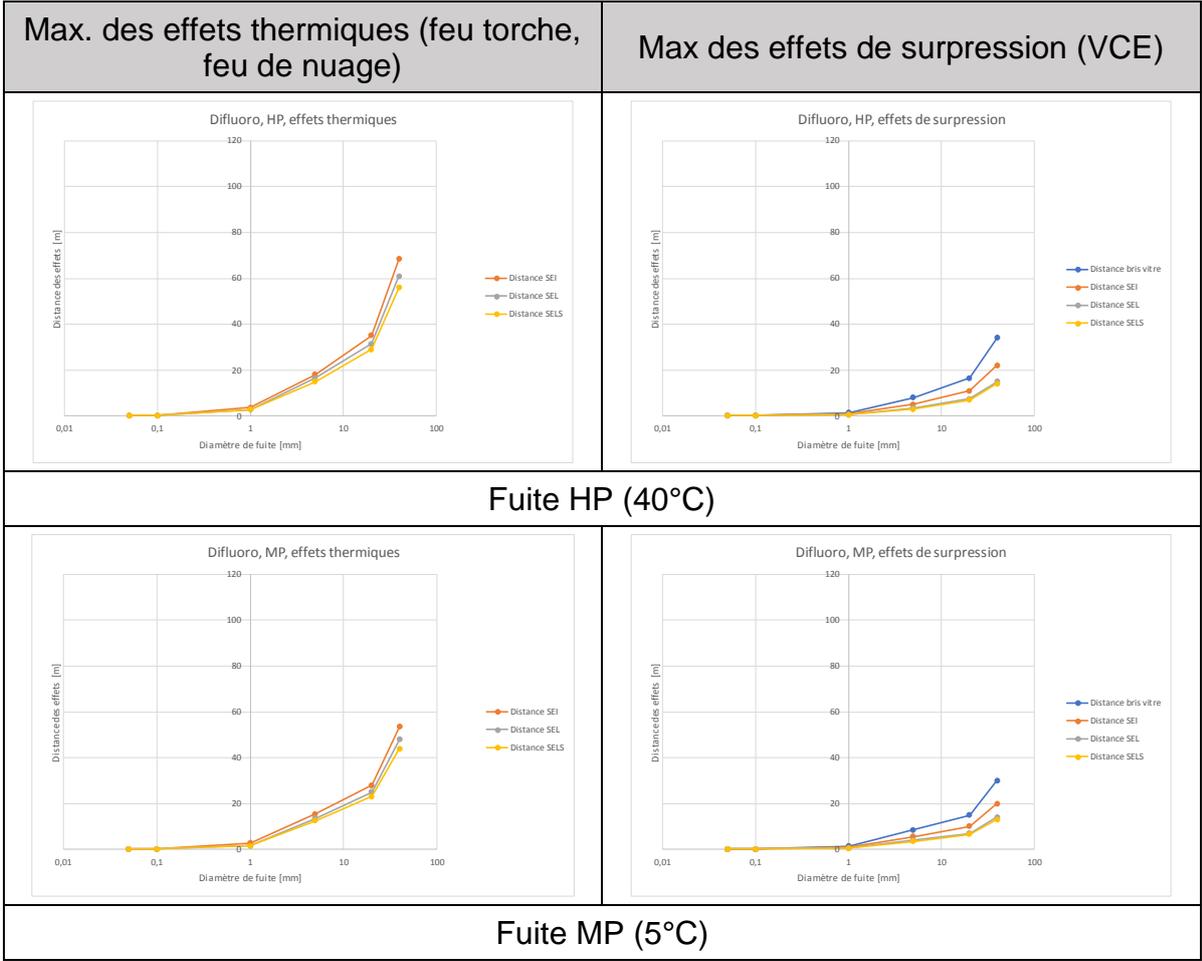


Figure 5. Fuite de difluoroéthane (R152A)

4.2.3 FLUIDE DE CATEGORIE A2L : DIFLUOROMETHANE

4.2.3.1 RESULTATS OBTENUS AVEC LE DIFLUOROMETHANE (HP, MP ET BP)

Pour le difluorométhane, il n'existe pas de VSTAF.

Les tableaux suivants présentent les caractéristiques de la fuite telle que prédite par le code PHAST v6.54. Il convient de préciser que D_{LIE} et R_{LIE} correspondent aux distances à la LIE respectivement dans l'axe du jet et transversalement au jet.

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
Débit [g/s]	< 0,1	0,4	36,4	910,9	4441,5	19733,4
D_{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	0,2	1,6	3,6	7,5
R_{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,3

Tableau 29. Caractéristiques de la fuite de difluorométhane en HP (40°C)

NB : si la fuite ne se fait pas sur la phase liquide sous pression mais gazeuse, les données du tableau précédent deviennent :

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
Débit [g/s]	< 0,1	0,4	36,4	910,9	4441,5	19733,4
D_{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	0,2	1,6	3,6	7,5
R_{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,3

Tableau 30. Caractéristiques de la fuite gazeuse de difluorométhane en HP (40°C)

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
Débit [g/s]	< 0,1	< 0,1	5,7	141,5	2053,7	9058,4
D_{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,5	1,8	3,8
R_{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,2

Tableau 31. Caractéristiques de la fuite de difluorométhane en MP (5°C)

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
Débit [g/s]	< 0,1	0,1	10,7	268,3	992,7	4263,1
D_{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	0,3	1,7	3,5	7,2
R_{LIE} [m]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,1	0,3

Tableau 32. Caractéristiques de la fuite de difluorométhane en BP (-30°C)

4.2.3.1.1 EFFETS LIÉS A UN FEU TORCHE

Les effets thermiques liés au feu torche ont été étudiés à l'aide du logiciel PHAST v6.54 :

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
SEI [m]	NA	NA	2,5	18,0	38,0	75,0
SEL [m]	NA	NA	NA	16,5	35,5	69,5
SELS [m]	NA	NA	NA	15,5	33,5	65,0

Tableau 33. Effets liés à un feu torche pour une fuite de difluorométhane en HP (40°C)

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
SEI [m]	NA	NA	NA	16,0	31,5	61,5
SEL [m]	NA	NA	NA	15,0	29,5	57,0
SELS [m]	NA	NA	NA	14,0	27,5	53,5

Tableau 34. Effets liés à un feu torche pour une fuite de difluorométhane en MP (5°C)

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
SEI [m]	NA	NA	NA	13,0	24,0	46,0
SEL [m]	NA	NA	NA	12,0	22,0	42,5
SELS [m]	NA	NA	NA	11,0	20,5	39,5

Tableau 35. Effets liés à un feu torche pour une fuite de difluorométhane en BP (-30°C)

4.2.3.1.2 EFFETS LIÉS AU FEU DE NUAGE

Les effets thermiques liés au feu de nuage ont été déterminés conformément

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
SEI [m]	< 0,1	< 0,1	0,2	1,8	4,0	8,5
SEL [m]	< 0,1	< 0,1	0,2	1,6	3,6	7,5
SELS [m]						

Tableau 36. Effets liés à un feu de nuage pour une fuite de difluorométhane en HP (40°C)

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
SEI [m]	< 0,1	< 0,1	0,2	1,9	3,9	8,0
SEL [m]	< 0,1	< 0,1	0,2	1,7	3,5	7,2
SELS [m]						

Tableau 37. Effets liés à un feu de nuage pour une fuite de difluorométhane en MP (5°C)

D [mm]	0,05	0,10	1	5	20	40
SEI [m]	< 0,1	< 0,1	0,3	1,9	3,9	8,0
SEL [m]	< 0,1	< 0,1	0,3	1,7	3,5	7,2
SELS [m]						

Tableau 38. Effets liés à un feu de nuage pour une fuite de difluorométhane en BP (-30°C)

4.2.3.1.3 SYNTHÈSE DES RESULTATS AVEC LE DIFLUOROMETHANE

La *Figure 6* présente la synthèse des résultats dans le cas d'une fuite libre de difluorométhane.

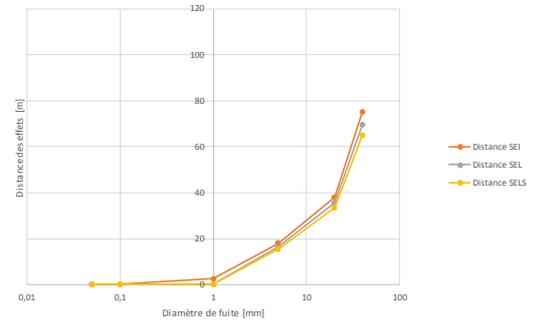
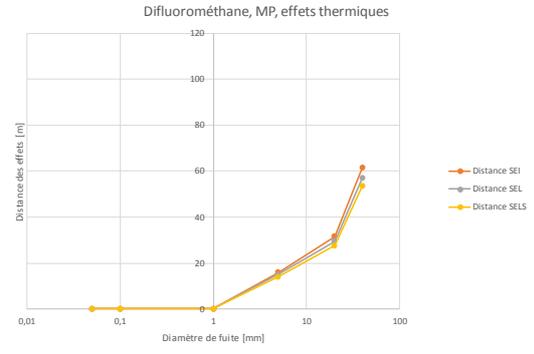
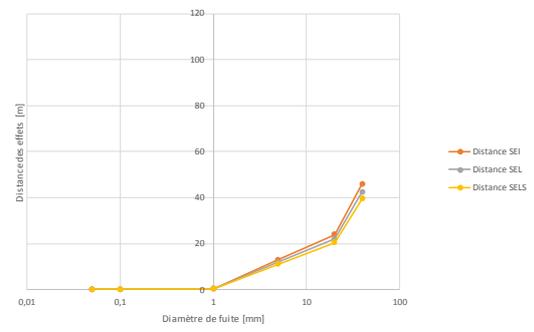
Max. des effets thermiques (feu torche, feu de nuage)	Max des effets de surpression (VCE)
<p data-bbox="347 297 598 320">Difluorométhane, HP, effets thermiques</p> 	<p data-bbox="986 293 1158 324">Pas d'effets</p>
<p data-bbox="659 674 887 705">Fuite HP (40°C)</p>	
<p data-bbox="347 730 598 752">Difluorométhane, MP, effets thermiques</p> 	<p data-bbox="986 725 1158 757">Pas d'effets</p>
<p data-bbox="667 1106 879 1137">Fuite MP (5°C)</p>	
<p data-bbox="347 1162 598 1184">Difluorométhane, BP, effets thermiques</p> 	<p data-bbox="986 1158 1158 1189">Pas d'effets</p>
<p data-bbox="655 1538 890 1570">Fuite BP (-30°C)</p>	

Figure 6. Fuite de difluorométhane (R32)

4.3 HIERARCHISATION DE LA NOCIVITE DES FUMÉES TOXIQUES

Sur une base purement théorique, le *Tableau 39* établit une hiérarchisation des effets toxiques attendus lors d'une fuite enflammée de fluide frigorigène (ou feu torche). L'objectif de ce tableau est d'aider les pompiers à évaluer le niveau de toxicité des fumées et à s'équiper de façon adéquate en fonction de la nature des gaz susceptibles d'être émis. Les cellules en vert correspondent aux fluides déjà autorisés sur le marché.

Classe	Nom chimique	Nom commercial	Niveau de toxicité	En théorie, gaz produits (en plus du CO et CO ₂)
A1	Trifluorométhane	R23		HF
	1,1,1,2-tétrafluoroéthane	R134a		HF
	Octafluoropropane	R218		HF
A2L	Difluorométhane	R32		HF
	1,1,1-trifluoroéthane	R143a		HF
	2,3,3,3-tétrafluoropro-1-ène	R1234yf		HF
	Trans-1,3,3,3-tétrafluoropro-1-ène	R1234ze		HF
A2	1,1-difluoroéthane	R152a		HF
A3	Méthane	R50		
	Ethane	E170		
	Ethène	R1150		
	Propane	R290		
	Propène	R1270		
	Butane	R600		
	2-méthyl propane	R600a		
	Pentane	R601		
	2-méthyl butane	R601a		
B1	1,1,1,3,3-pentafluoropropane	R245fa		HF
B2L	Ammoniac	R717		HCN, NO ₂

Tableau 39. Hiérarchisation des effets toxiques attendus en fonction du fluide

Cette hiérarchisation est basée sur le seuil équivalent des effets irréversibles de toxicité des fumées pour une durée d'exposition de 1 h. Ce seuil a été calculé selon la méthodologie suivante :

- Le débit de fuite est identique pour l'ensemble des fluides frigorigènes.
- Le PCI de chaque fluide est calculé à l'aide de la formule de Boie.
- Lors de la réaction de combustion, les atomes se recombinent selon les règles couramment utilisées dans les études de dispersion de fumées toxiques. Ces règles reposent sur la connaissance des propriétés physiques et chimiques des matières mises en jeu et sur des données expérimentales dont dispose l'INERIS. Le lecteur intéressé pourra trouver plus d'information dans [INERIS, 2015].

Au regard des résultats, on peut conclure que le fait d'élargir le choix possible des fluides frigorigènes n'induit pas un surrisque du point de vue de la toxicité des fumées par rapport aux fluides déjà actuellement acceptés sur le marché. Si les pompiers arrivent à maîtriser ce risque avec les fluides de classe A1, il n'y a pas de raison pour que cela ne soit plus le cas avec les fluides des autres classes.

4.4 RISQUE DE FORMATION D'UNE NAPPE DE GAZ INFLAMMABLE

Même si le risque d'inflammabilité est bien maîtrisé dans la zone proche du point de fuite, on ne peut pas exclure que des traces de fluide frigorigène (donc de classe A2, A2L ou A3) finissent par s'accumuler dans une partie ou la totalité du volume de l'espace entraînant la formation d'une nappe de gaz inflammable. Si cette nappe rencontre ensuite une source d'énergie suffisante, il peut y avoir un VCE.

Cependant, il faut prendre en considération le fait que les ERP ne sont jamais parfaitement étanches et qu'une ventilation est toujours présente. Toutefois, il apparaît que le taux horaire de renouvellement d'air dans ces espaces est relativement faible⁴, plus proche d'une ventilation naturelle que d'une ventilation forcée. De plus, même si cette ventilation est réelle, cette capacité à évacuer rapidement toute trace de fluide inflammable va dépendre fortement de la façon dont sont disposées les entrées et sorties d'air dans l'ERP. Compte tenu de la diversité des situations rencontrées sur le terrain, il n'est pas sûr que la ventilation assure à chaque fois un balayage rigoureux de l'ensemble du volume. Dès lors, l'INERIS n'est pas favorable à valoriser une quelconque influence de la ventilation dans la présente étude.

Une alternative possible est de limiter la charge en fluide frigorigène de telle sorte que, en cas de perte de confinement sur le système thermodynamique, on puisse exclure tout risque de formation d'une nappe de gaz inflammable dans l'ERP. Plusieurs options sont possibles.

⁴ Si l'on prend une chambre d'hôtel simple, de surface 9 m², le volume de l'espace est donc de l'ordre de 22,5 m³. Il est habituel de considérer qu'il faut un débit d'air neuf de l'ordre de 20 à 25 m³/h. Le taux horaire de renouvellement d'air est donc au maximum de 25/22,5 soit de 1,1 h⁻¹. Dans les magasins, des discussions récentes menées avec PERIFEM ont montré que ce taux était d'environ 1,8 h⁻¹. Par comparaison, dans les salles des machines des installations de réfrigération fonctionnant à l'ammoniac, la ventilation d'urgence doit assurer un taux de renouvellement d'air de 10 à 20 h⁻¹ en cas de détection gaz.

4.4.1 OPTION N°1 : CONCENTRATION SUPPOSEE HOMOGENE DANS LE LOCAL ET LIMITEE A X% DE LA LIE

Dans cette approche, l'ERP est supposé étanche (pas de porte ouverte sur un espace contigu, ni de perte d'étanchéité au niveau de l'enveloppe du local) et est assimilé à un volume élémentaire à l'intérieur duquel la concentration est homogène dans l'espace (cf. *Figure 7*).

La masse maximale de fluide frigorigène est alors donnée par :

$$m_{\max} = X \times LFL \times A \times h \quad \text{Équation 1}$$

Où :

m_{\max} [kg] correspond à la charge maximale en fluide inflammable,

LFL [kg/m³] à la limite inférieure d'inflammabilité⁵,

A [m²] à la surface de l'ERP,

h [m] à la hauteur de l'ERP,

X [%] au coefficient de sécurité par rapport à la LFL.

Pour information, la norme [NF EN 378, 2017] utilise une telle approche pour calculer la charge maximale d'applications (autres que celles liées au confort) en utilisant X = 20%.

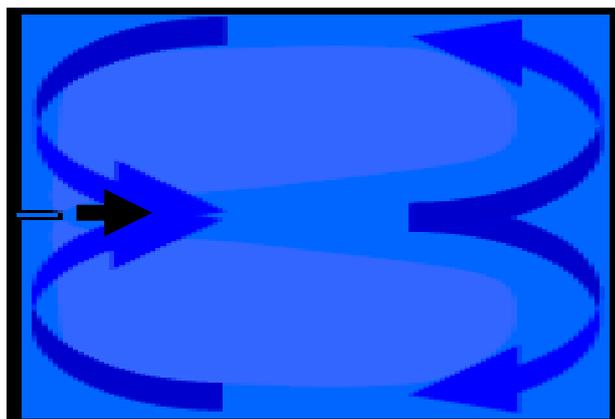


Figure 7. Illustration de l'approche n°1 avec la concentration homogène dans tout le local

Remarque : cette option est surtout pertinente dans le cas d'une fuite très importante survenant dans un local peu volumineux.

⁵ Lower Flammability Limit en anglais

4.4.2 OPTION N°2 : CONCENTRATION SUPPOSEE HOMOGENE SOUS L'EQUIPEMENT ET LIMITEE A X% DE LA LIE

Dans cette approche, l'ERP est toujours supposé étanche mais, du fait de son comportement de gaz lourd, le réfrigérant remplit de façon homogène la partie basse du local délimitée en hauteur par la position de l'équipement fuyard (cf. *Figure 8*).

La masse maximale de fluide frigorigène est alors donnée par :

$$m_{\max} = X \times LFL \times A \times h_0 \quad \text{Équation 2}$$

Où :

h_0 [m] correspond à la hauteur de l'équipement fuyard,

Remarque : cette option est surtout pertinente dans le cas d'une fuite très importante survenant dans un local de surface peu importante au sol. D'une certaine façon, cette approche a l'avantage de tenir compte du comportement de gaz lourd de la fuite.

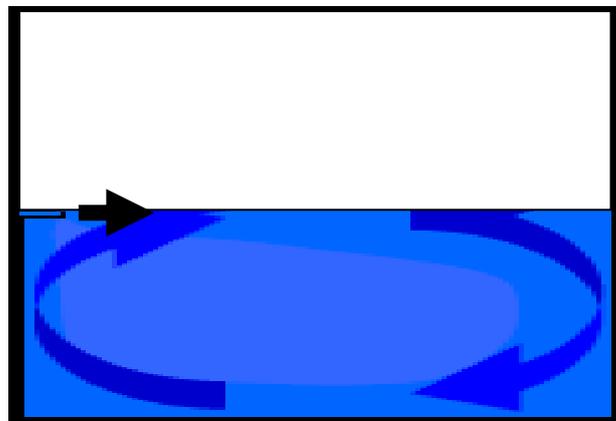


Figure 8. Illustration de l'approche n°2 avec la concentration homogène sous l'équipement

4.4.3 OPTION N°3 : FORMULE DE KATAOKA

A partir des travaux de [KATAOKA, YOSHIZAWA et HIRAKAWA, 2000], la norme [NF EN 378-1] propose la formule suivante pour le calcul de la charge maximale en fluide frigorigène :

$$m_{\max} = 2,5 \times LFL^{5/4} \times h_0 \times A^{1/2} \quad \text{Équation 3}$$

Où :

h_0 correspond à un coefficient lié à la hauteur de l'appareil dans l'ERP :

- = 0,6 pour un emplacement au sol,
- = 1,1 pour un montage sur fenêtre,
- = 1,8 pour un emplacement au mur,
- = 2,2 pour un montage au plafond.

Selon la norme, cette relation ne s'applique *stricto sensu* que pour les systèmes de conditionnement d'air ou les pompes à chaleur destinés au confort des personnes (= champ de l'étude) et pour les fluides frigorigènes dont la masse moléculaire est supérieure à 42 g/mol.

Cette relation suscite plusieurs remarques de la part de l'INERIS :

- Grâce à cette formule, il est aussi possible de connaître la surface minimale à traiter de point de vue du confort thermique connaissant la charge en fluide frigorigène (utilisation inverse de la formule).
- Selon les auteurs de cette publication scientifique, cette formule est tirée de l'exploitation de résultats expérimentaux et numériques. Ces résultats montrent que, en cas de perte de confinement sur le système thermodynamique, la concentration au niveau du sol ne cessera d'augmenter tant que la fuite perdure. Si l'on fait exception de ce qui se passe dans la zone proche de la fuite, la concentration maximale sera obtenue au niveau du sol dans le local. Ceci reste cohérent avec le comportement de gaz lourd de la fuite.
- La formule est basée sur le fait que, en limitant la charge en fluide frigorigène, on limite donc la durée de la fuite et, par voie de conséquence, la concentration maximale au niveau du sol du local. En s'assurant que cette concentration ne dépasse pas la LIE, il est donc possible d'exclure tout risque de formation de nappe de gaz inflammable dans le local. A noter que cette formule ne tient pas compte d'une quelconque ventilation du local qui aura tendance à réduire encore plus ce risque. Le local est donc encore supposé étanche.
- Cette formule repose sur les hypothèses suivantes :
 - Fluide considéré = difluorométhane (R32), propane (R290) et 1,1-difluoroéthane (R152a)
 - Durée de la fuite = 4 mm
 - Vitesse de la fuite = vitesse minimale (sans plus de précision). Les auteurs précisent que cette hypothèse a été prise pour tenir compte du fait que le point de fuite s'effectue dans un capotage équipé d'ouverture. Dès lors, le fluide s'échappe du capotage avec une vitesse bien plus faible que celle au point de fuite.
 - Profil de du champ de concentration en fonction de la hauteur dans le local = parabolique.

- Hauteur de la fuite = de 0,5 à 1,8 m.
- Surface au sol = de 7 à 700 m².

4.4.4 MISE EN APPLICATION DE CES APPROCHES SUR UN CAS CONCRET

Soit un multisplit fonctionnant au propane (R290), donc LIE = 38 g/m³ selon [NF EN 378, 2017], et venant équiper en climatisation :

- Une chambre d'hôtel, de surface au sol 15 m² et de volume 40 m³.
- Une supérette, de surface au sol 500 m² et de volume 2000 m³.

Le *Tableau 40* présente la charge maximale en fluide en fonction de l'approche utilisée (pour information, X = 20% pour les options n°1 et 2). Grâce à ces deux exemples, on constate que la formule proposée par [KATAOKA et al., 2000], et reprise dans la norme [NF EN 378, 2017] pour les installations de confort, est relativement prudente par rapport aux autres approches proposées. Ne disposant pas d'alternative plus pertinente (avec vitesse et durée de fuite plus importantes), l'INERIS décide de retenir l'option n°3.

Chambre d'hôtel (A = 15 m², V = 40 m³)				
Hauteur de l'unité terminale (= évaporateur)				
Option n°	0,6 m	1,1 m	1,8 m	2,2 m
1	0,304			
2	0,068	0,125	0,205	0,251
3	0,097	0,179	0,292	0,357

Supérette (A = 500 m², V = 2000 m³)				
Hauteur de l'unité terminale (= évaporateur)				
Option n°	0,6 m	1,1 m	1,8 m	2,2 m
1	15,200			
2	2,280	4,180	6,840	8,360
3	0,563	1,032	1,688	2,063

Tableau 40. Charge maximale en propane [en kg]

5. ENSEIGNEMENTS LIES AUX MODELISATIONS

De ces résultats, l'INERIS aboutit aux constatations suivantes :

- Risque d'anoxie lié à la fuite : même risque que pour les fluides (déjà autorisés) de classes A1.
- Risque lié à la toxicité des fumées en cas de feu torche de la fuite : risque plutôt moindre par rapport aux fluides (déjà autorisés) de classes A1.
- Risque lié à l'inflammation d'une fuite de fluide frigorigène (classes concernées : A2L, A2, A3, B2L, B2 et B3) :
 - Pour les petites et moyennes fuites, la distance à la LIE peut aller jusqu'à 1 ou 2 m. Dans ce périmètre, il faudra s'assurer qu'il n'y ait pas de source d'énergie suffisante pouvant générer un feu torche ou un VCE.
 - L'inflammation d'une fuite de fluides classés A2L et B2L ne générera pas d'effets de surpression du fait de leur faible vitesse de propagation de flamme (propriété intrinsèque aux fluides de cette classe).
- Risque lié à la formation d'une nappe de gaz inflammable (classes concernées : A2L, A2, A3, B2L, B2 et B3) :
 - Compte tenu de la diversité des situations pouvant être rencontrées sur le terrain (géométrie du local, taux horaire de renouvellement d'air, localisation des entrées/sorties d'air...), l'approche proposée par la norme NF EN 378 est intéressante. Celle-ci consiste à limiter la charge frigorifique pouvant fuir dans un local de telle sorte que la concentration maximale, atteinte au niveau du sol du fait du comportement lourd de la fuite, ne puisse pas atteindre la LIE du fluide frigorigène concerné. Cette charge maximale est donnée par l'Equation 3 de l'annexe.

ANNEXE 5 : Comparaison des prescriptions issues de cette étude avec celles du GZ (discussion limitée aux fluides inflammables)

	Présente étude	GZ	
Nature du fluide	Gaz liquéfié	Combustible gazeux	GZ1
Inventaire du fluide	Limité à la charge du système thermodynamique	Illimité si l'alimentation se fait à partir du réseau Limité si elle se fait à partir d'une bouteille	
Stockage du fluide	L'implantation du système thermodynamique est autorisée dans les locaux accessibles au public et à l'extérieur (au sol, en toiture ou dans une salle des machines)	Les bouteilles de propane commercial doivent être installées à l'extérieur des bâtiments accessibles au public : en plein air, dans un abri ou dans tout autre local ; toutefois les toitures des bâtiments accessibles au public ne peuvent être utilisées	GZ7
Pression maximale de distribution dans l'ERP	Plusieurs dizaines de bar en HP (\approx pression de vapeur saturante du fluide concerné)	4 bar 1,75 bar à partir d'une bouteille de propane commercial	GZ10
Détente du fluide	Le détendeur peut être présent à l'intérieur de l'ERP	Les détendeurs isolés ou groupés en batterie et les blocs de détente doivent être accessibles de l'extérieur sans communication avec l'intérieur du bâtiment (hormis quelques exceptions)	GZ10
Phase de la fuite dans l'ERP	Diphasique	Gazeuse	
Comportement de la fuite dans l'ERP	Lourd (présence de gouttelettes dans nuage)	Lourd, neutre ou léger (selon nature du fluide)	
Maîtrise du risque de fuite dans l'ERP	D < 10 mm environ dans ERP sans source d'inflammation à moins de 2 m de la tuyauterie	Pas de canalisation si : D > 108 mm si P \leq 100 mbar D > 70 mm si P \leq 400 mbar D > 37 mm si P > 400 mbar (Note INERIS : distance à la LIE = 1 à 2 m pour ces situations)	GZ13
Maîtrise du risque de dispersion dans l'ERP	Charge limitée de telle sorte que l'on n'atteigne pas le LIE au niveau du sol	Présence d'un organe de coupure de branchement Présence d'un organe de coupure de bâtiment Présence d'un organe de coupure automatique	GZ14

		<p>si alimentation à partir du réseau et pour toute conduite avec $P > 400$ mbar et comportant un parcours intérieur au bâtiment (fermeture si débit $> 1,5 \cdot$ débit nominal)</p> <p>(Note : organe de coupure automatique pas nécessaire si alimentation à partir d'un récipient)</p>	
		<p>Tout local où le public a accès et renfermant un appareil de type A ou B doit comporter un ouvrant sur l'extérieur d'au moins $0,40 \text{ m}^2$ de surface, permettant l'aération rapide du local en cas de nécessité</p>	GZ21
<p>Maîtrise des effets domino du local spécifique (ou salle des machines) vers l'ERP</p>	<p>Les parois de la salle doivent être REI60 et réalisées en éléments classés A2-s1,d0.</p> <p>Les matériaux de la toiture et du sol sont respectivement classés A2-s1,d0 et A2fl-s1.</p>	<p>Isolation des autres locaux accessibles au public par des parois coupe-feu 1 h réalisés en matériaux classés en catégorie M0 ou A2-s2,d0.</p> <p>Toiture du local doit être réalisée en matériaux légers classés en catégorie M0 ou A2-s2,d0</p> <p>Le sol doit être horizontal et réalisé en matériaux classés en catégorie M0 ou A2fl-s1.</p>	GZ7
<p>Maîtrise du risque de dispersion dans le local spécifique (ou salle des machines)</p>	<p>Si charge limitée dans la salle des machines : pas de mesures</p> <p>Si charge non limitée dans la salle des machines : détection asservie à l'extraction du local (et fiabilisation de cette chaîne de sécurité pour que l'ensemble du volume de la salle des machines ne soit pas une zone ATEX)</p>	<p>Présence d'un organe de coupure</p> <p>Local ventilé par deux orifices de ventilation, l'un en position haute et l'autre en position basse</p> <p>(Surface d'ouverture différente selon le cas)</p> <p>L'amenée d'air nécessaire au fonctionnement des appareils de type A et B peut être directe, indirecte, mécanique ou naturelle. L'évacuation de l'air vicié par les produits de combustion</p>	GZ7, GZ10 et GZ21

		des appareils de type A doit être réalisée en totalité soit naturellement, soit mécaniquement.	
Documentation à fournir	Tracé du cheminement du réseau Marquage du réseau	Plans de l'installation Tracé des conduites de gaz Emplacement des organes de détente et de coupure Types d'appareils utilisés et leur puissance Emplacement des conduits d'évacuation des produits de combustion et des dispositifs de ventilation et d'aération	GZ3
Opération de maintenance	Les opérations de maintenance peuvent avoir lieu sur site, sous réserve de prendre les mesures adaptées (par exemple, arrêt du système, balisage d'un périmètre d'intervention...)	Le changement et le raccordement des récipients doivent s'effectuer hors de la présence du public	GZ5

ANNEXE 6 : Fiches pratiques

En appliquant les règles d'implantations à des cas concrets, ces fiches pratiques permettent d'illustrer les règles d'installation proposées. Le but de ces fiches n'est pas d'être exhaustif quant à l'ensemble des installations existantes ou possibles.

Le système étudié est un hôtel comprenant 10 chambres. Trois systèmes de conditionnement sont envisagés :

- Fiche n°1 : DRV commun en échange direct ;
- Fiche n°2 : monosplit dans chaque chambre ;
- Fiche n°3 : chiller en échange indirect.

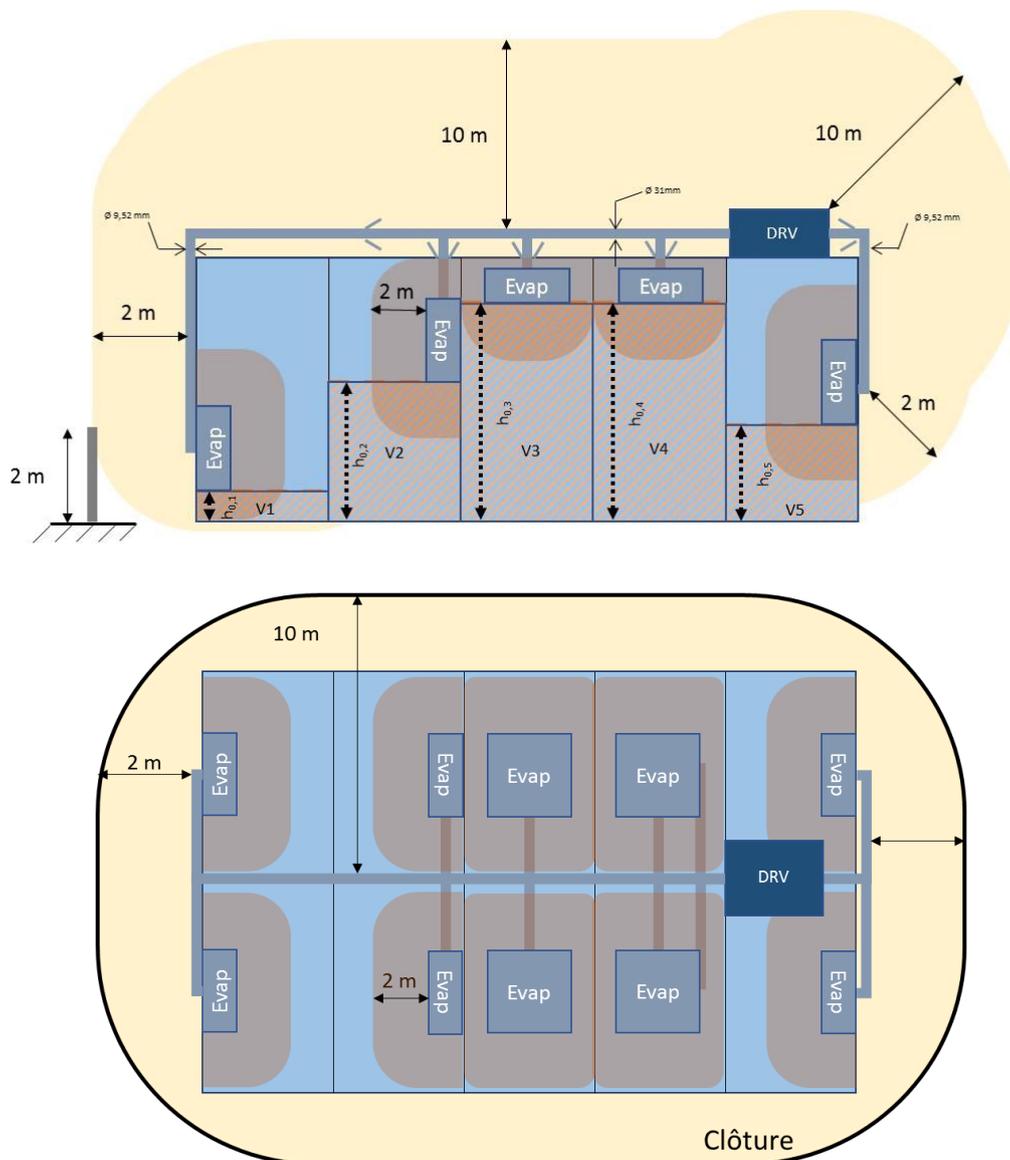
Les spécifications communes aux trois fiches pratiques sont décrites dans le tableau ci-dessous.

Implantation	Surface unitaire d'une chambre	25 m ²
	Volume unitaire d'une chambre	70 m ³
	Surface totale à refroidir	250 m ²
	Volume total à refroidir	700 m ³
Utilisation	Puissance en froid par m ²	110 W _{froid} /m ²
	Puissance en froid par chambre	2 750 W _{froid}
	Puissance en froid total	27 500 W _{froid}
Fluide frigorigène	Nom du fluide	R32
	Classe sécurité	A2L

FICHE N°1 : DRV DANS UN HOTEL

Le système de réfrigération est constitué d'un ensemble compresseur – condenseur positionné en toiture-terrasse de l'hôtel. Les évaporateurs sont positionnés dans chaque chambre, à des hauteurs variables (soit au niveau du sol, soit sur les murs, soit au plafond). Les équipements sont reliés par des tuyauteries : tuyauterie BP sur le circuit détendeur – évaporateur - compresseur (diamètre de 31 mm sur le collecteur commun et 9,52 mm de part et d'autre de chaque évaporateur) et tuyauterie HP sur le circuit compresseur – condenseur - détendeur (diamètre de 12,7 mm et 6,35 mm).

Les règles d'isolement sont illustrées sur le schéma suivant :



Spécifications de système :

Implantation	Catégorie	II – Compresseur à l'extérieur de l'ERP
	Complément	Système direct
Utilisation	Quantité de fluide selon la puissance	0,330 g/W _{froid} (hypothèse)
Caractéristiques techniques	Pression BP	9 bar
	Pression HP	27 bar
	Diamètre BP	9,52 mm à 31 mm
	Diamètre HP	6,35 mm à 12,7 mm
Fluide frigorigène	Quantité de fluide totale	9,08 kg
	Quantité de fluide par chambre	907,5 g

Règles d'implantation :

Général	<ul style="list-style-type: none">• Installation réalisée par personne compétente, avec des équipements et matériaux adaptés répondant aux normes en vigueur• Installation respectant les règles préconisées par le fournisseur• Canalisations métalliques avec le minimum de brides et de raccords• Cheminement qui réduit la vulnérabilité ou protection mécanique• Circulation des canalisations le plus possible à l'extérieur de l'ERP
Extérieur	<ul style="list-style-type: none">• Les équipements sont adaptés aux conditions extérieures (prise en compte du risque de corrosion)• Le diamètre maximum est de 31 mm (donc bien inférieur à 50 mm)• Tuyauterie accessible aux seules personnes autorisées• Les calorifuges des tuyauteries et équipements en extérieur doivent être réalisés en matériaux D-s1,d0• Les parois du DRV doivent être en matériau classés en A2-S1,d0.• Une distance horizontale d'isolement doit être respectée vis-à-vis de toute zone accessible au public :<ul style="list-style-type: none">○ Quand le diamètre est égal à 31 mm, une distance de 10 m doit être respectée.○ Quand le diamètre est égal à 9,52 mm, une distance de 2 m doit être respectée• Cet éloignement doit être matérialisé par un mur ou une clôture d'au moins 2 m de haut• Les parties en extérieur doivent être implantées suffisamment loin de tout orifice de ventilation ou ouvrant pour prévenir l'accumulation de fluide inflammable en cas de fuite sur le circuit.• Le compresseur et le condenseur situés en toiture-terrasse doivent être installés :<ul style="list-style-type: none">○ soit sur une assise (dalle, socle, soubassement) EI60 réalisée en éléments classés A2-s1,d0.○ soit sur des plots en matériau A2-s1,d0, de façon à obtenir une isolation thermique sous toute sa surface par une lame d'air

	ventilée de 20 cm d'épaisseur
Intérieur	<ul style="list-style-type: none"> • Tous les diamètres sont bien inférieurs à 10 mm • Si le système thermodynamique est équipé d'une soupape, le rejet de celle-ci doit être évacué en dehors de l'ERP (rejet canalisé). • La quantité de fluide circulant à l'intérieur de l'ERP est limitée par le calcul de l'équation 1 (cf. ci-dessous). La charge totale est supérieure à la charge autorisée dans chacune des pièces. Cette configuration n'est pas autorisée. • Calorifuge des équipements et tuyauteries : A2-s1,d0 • Aucune source d'inflammation à moins de 2 m

Détail du calcul de charge pour chacune des pièces de l'hôtel :

La quantité de fluide frigorigène doit être calibrée pour les volumes de chaque type de chambre en tenant compte des différents types d'installation ($h_{0,1} = 0,6$; $h_{0,2} = 1,8$; $h_{0,3} = 2,2$; $h_{0,4} = 2,2$; $h_{0,5} = 1,1$).

$$m_{max,1} = 2,5 \times 0,307^{5/4} \times 0,6 \times 25^{1/2} = 1,71 \text{ kg}$$

$$m_{max,2} = 2,5 \times 0,307^{5/4} \times 1,8 \times 25^{1/2} = 5,14 \text{ kg}$$

$$m_{max,3} = m_{max,4} = 2,5 \times 0,307^{5/4} \times 2,2 \times 25^{1/2} = 6,28 \text{ kg}$$

$$m_{max,5} = 2,5 \times 0,307^{5/4} \times 1,1 \times 25^{1/2} = 3,14 \text{ kg}$$

On remarque que dans chacun des cas d'implantation, **la charge de fluide frigorigène autorisée par l'équation 1 ne permet pas d'utiliser le système envisagé pour refroidir les 10 chambres (quantité totale requise de 9,08 kg supérieure aux charges maximales autorisées)**. Il est conseillé d'utiliser un système décentralisé, ou une détente indirecte.

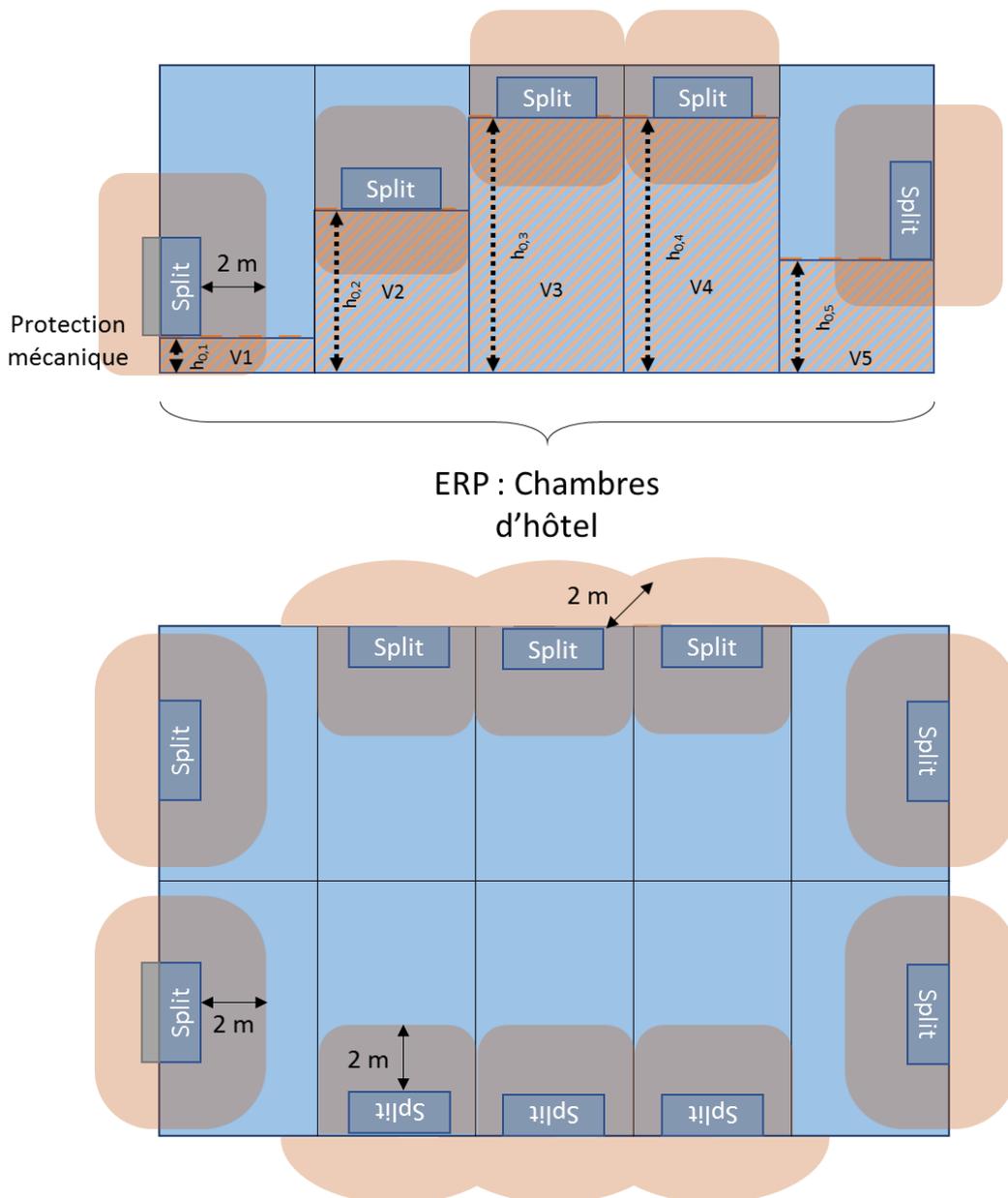
Remarque : Si l'hôtel ne comportait que 6 chambres avec des évaporateurs au plafond, un tel système DRV serait possible.

Remarque : Si le fluide est de catégorie A3, la quantité de fluide maximale autorisée est encore réduite.

FICHE N°2 : MONOSPLITS DANS UN HOTEL

Le système de réfrigération est constitué de monosplits installés dans chaque chambre de l'hôtel. Les évaporateurs sont positionnés dans chaque chambre, à des hauteurs variables (soit au niveau du sol, soit sur les murs, soit au plafond). Les condenseurs sont positionnés sur l'extérieur. Les diamètres des tuyauteries sont de 6,4 mm en HP et 9,7 mm en BP.

Les règles d'isolement sont illustrées sur le schéma suivant :



Spécifications techniques :

Implantation	Catégorie	I – Compresseur à l'intérieur de l'ERP
Utilisation	Quantité de fluide selon la puissance	0,215 g/W _{froid} (hypothèse)
Caractéristiques techniques	Pression BP	9 bar
	Pression HP	27 bar
	Diamètre BP	9,7 mm
	Diamètre HP	6,4 mm
Fluide frigorigène	Quantité de fluide totale	5,91 kg
	Quantité de fluide par chambre	591 g par chambre

Règles d'implantation :

Général	<ul style="list-style-type: none">• Installation réalisée par personne compétente, avec des équipements et matériaux adaptés répondant aux normes en vigueur• Installation respectant les règles préconisées par le fournisseur• Canalisations métalliques avec le minimum de brides et de raccords• Cheminement qui réduit la vulnérabilité ou protection mécanique• Circulation des canalisations le plus possible à l'extérieur de l'ERP
Extérieur	<ul style="list-style-type: none">• Les équipements sont adaptés aux conditions extérieures (prise en compte du risque de corrosion)• Le diamètre maximum est de 9,7 mm (donc bien inférieur à 50 mm)• Tuyauterie accessible aux seules personnes autorisées (capotage)• Les calorifuges des tuyauteries et équipements en extérieur doivent être réalisés en matériaux D-s1,d0• Les parois du DRV doivent être en matériau classés en A2-S1,d0.• Une distance horizontale d'isolement de 2 m doit être respectée vis-à-vis de toute zone accessible au public• Cet éloignement doit être matérialisé par un mur ou une clôture d'au moins 2 m de haut• Les parties situées au sol sont protégées par une protection mécanique.• Les parties en extérieur doivent être implantées suffisamment loin de tout orifice de ventilation ou ouvrant pour prévenir l'accumulation de fluide inflammable en cas de fuite sur le circuit.
Intérieur	<ul style="list-style-type: none">• Tous les diamètres sont bien inférieurs à 10 mm• Si le système thermodynamique est équipé d'une soupape, le rejet de celle-ci doit être évacué en dehors de l'ERP (rejet canalisé).• La quantité de fluide circulant à l'intérieur de l'ERP est limitée par le calcul de l'équation 1 (cf. ci-dessous). La charge nécessaire dans chaque chambre est bien inférieure à la charge maximale autorisée. Cette configuration est autorisée.• Calorifuge des équipements et tuyauteries : A2-s1,d0• Aucune source d'inflammation à moins de 2 m

Détail du calcul de charge pour chacune des pièces de l'hôtel :

La quantité de fluide frigorigène doit être calibrée pour les volumes de chaque type de chambre en tenant compte des différents types d'installation ($h_{0,1} = 0,6$; $h_{0,2} = 1,8$; $h_{0,3} = 2,2$; $h_{0,4} = 2,2$; $h_{0,5} = 1,1$).

$$m_{max,1} = 2,5 \times 0,307^{5/4} \times 0,6 \times 25^{1/2} = 1,71 \text{ kg}$$

$$m_{max,2} = 2,5 \times 0,307^{5/4} \times 1,8 \times 25^{1/2} = 5,14 \text{ kg}$$

$$m_{max,3} = m_{max,4} = 2,5 \times 0,307^{5/4} \times 2,2 \times 25^{1/2} = 6,28 \text{ kg}$$

$$m_{max,5} = 2,5 \times 0,307^{5/4} \times 1,1 \times 25^{1/2} = 3,14 \text{ kg}$$

En utilisant des unités séparées, la quantité de fluide qui peut fuir dans une pièce est inférieure aux limites de charges établies par l'équation 1 et ce quel que soit le type d'implantation de l'unité de réfrigération. **Ce mode de réfrigération est donc possible.**

Remarque : Si le fluide appartient à la catégorie A3 (par exemple le propane), ce modèle d'implantation n'est plus possible.

$$m_{max,1} = 2,5 \times 0,038^{5/4} \times 0,6 \times 25^{1/2} = 125,83 \text{ g}$$

$$m_{max,2} = 2,5 \times 0,038^{5/4} \times 1,8 \times 25^{1/2} = 377,50 \text{ g}$$

$$m_{max,3} = m_{max,4} = 2,5 \times 0,038^{5/4} \times 2,2 \times 25^{1/2} = 461,38 \text{ kg}$$

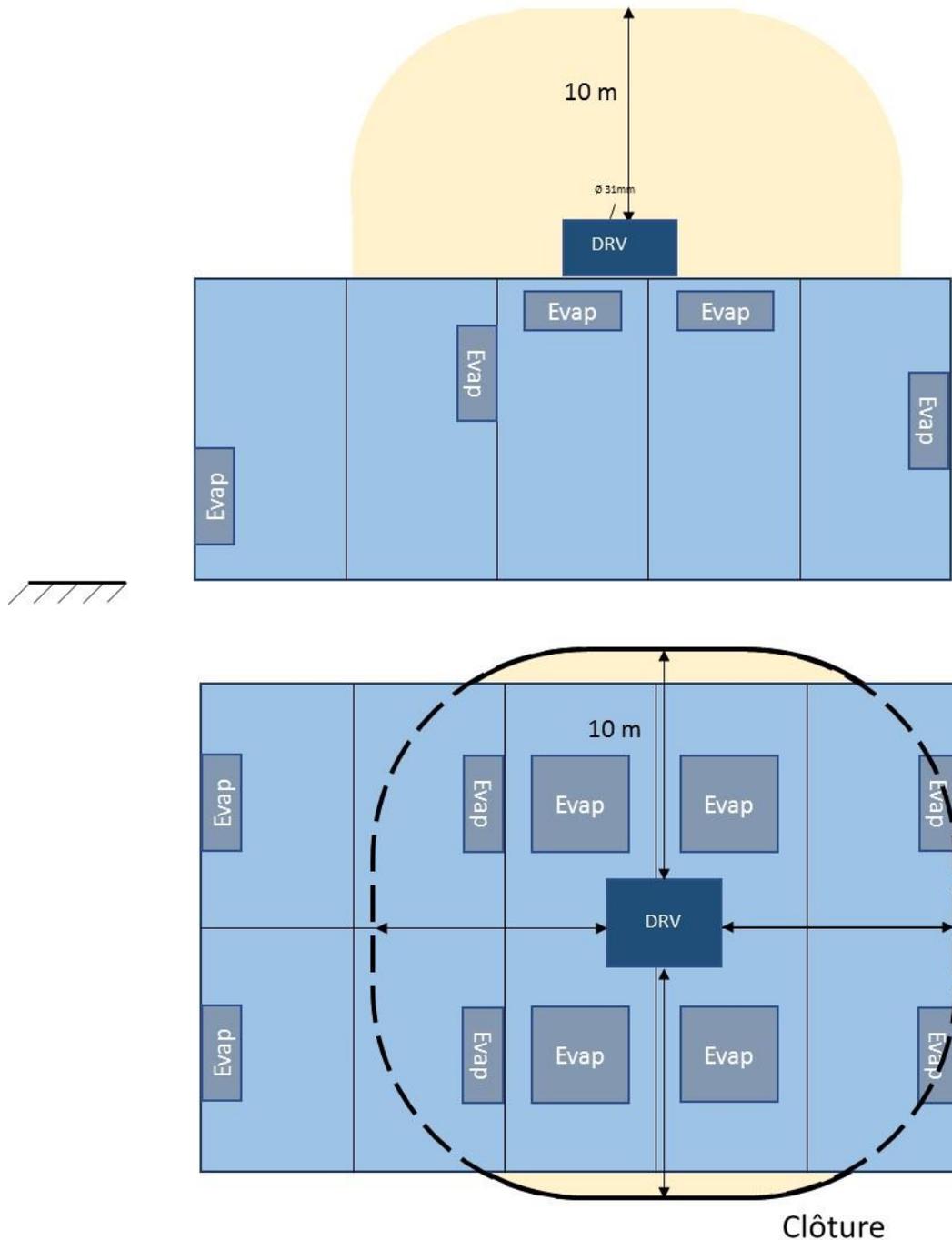
$$m_{max,5} = 2,5 \times 0,038^{5/4} \times 1,1 \times 25^{1/2} = 230,69 \text{ kg}$$

En effet, la masse de fluide nécessaire (591 g) est supérieure aux différentes quantités autorisées. Il est alors conseillé de mettre en place une détente indirecte.

FICHE N°3 : CHILLER EN TOITURE-TERRASSE AVEC ECHANGE INDIRECT POUR UN HOTEL

Le système de réfrigération est constitué d'un système centralisé installé en toiture-terrasse de l'hôtel. Le système est de type indirect : un fluide frigorigène A1 assure la réfrigération des différentes chambres de l'hôtel. Le fluide inflammable est localisé au niveau du DRV ; le diamètre maximal est de 31 mm.

Les règles d'isolement sont illustrées sur le schéma suivant :



Spécifications techniques :

Implantation	Catégorie	III – Compresseur à l'extérieur de l'ERP – Pas de fluide dans ERP
Utilisation	Quantité de fluide selon la puissance	0,215 g/W _{froid} (hypothèse)
Caractéristiques techniques	Pression BP	9 bar
	Pression HP	27 bar
	Diamètre BP	9,52 mm à 31 mm
	Diamètre HP	6,35 mm à 12,7 mm
Fluide frigorigène	Quantité de fluide totale	5,91 kg
	Quantité de fluide par chambre	/

Règles d'implantation :

Général	<ul style="list-style-type: none">• Installation réalisée par personne compétente, avec des équipements et matériaux adaptés répondant aux normes en vigueur• Installation respectant les règles préconisées par le fournisseur• Canalisations métalliques avec le minimum de brides et de raccords• Cheminement qui réduit la vulnérabilité ou protection mécanique• Circulation des canalisations le plus possible à l'extérieur de l'ERP
Extérieur	<ul style="list-style-type: none">• Les équipements sont adaptés aux conditions extérieures (prise en compte du risque de corrosion)• Le diamètre maximum est de 31 mm (donc bien inférieur à 50 mm)• Tuyauterie accessible aux seules personnes autorisées (capotage)• Les calorifuges des tuyauteries et équipements en extérieur doivent être réalisés en matériaux D-s1,d0• Les parois du DRV doivent être en matériau classés en A2-S1,d0.• Une distance horizontale d'isolement de 10 m doit être respectée vis-à-vis de toute zone accessible au public• Cet éloignement doit être matérialisé par un mur ou une clôture d'au moins 2 m de haut• Les parties situées au sol sont protégées par une protection mécanique.• Les parties en extérieur doivent être implantées suffisamment loin de tout orifice de ventilation ou ouvrant pour prévenir l'accumulation de fluide inflammable en cas de fuite sur le circuit.
Intérieur	<ul style="list-style-type: none">• /

**ANNEXE 7 : Supports présentés lors du colloque des responsables
départementaux prévention des services d'incendie et de secours du 1^{er}
décembre 2017**



Etude sur le remplacement des fluides frigorigènes

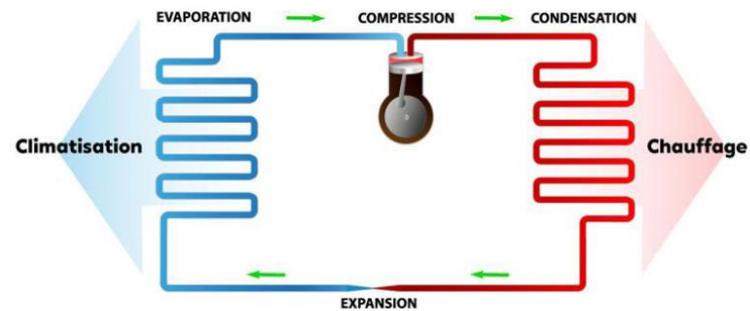
Paris, le 1^{er} décembre 2017



Système étudié

Uniquement des systèmes à compression (pas d'absorption, pas d'effet Peltier...)

Application : conditionnement d'air (froid/chaud) et/ou production d'eau chaude sanitaire



Colloque des responsables départementaux prévention des services d'incendie et de secours – 1^{er} décembre 2017



Classement des fluides frigorigènes

Même classification que celle de la norme NF-EN-378 :

	Faible toxicité ¹ (A)	Toxicité élevée (B)
Produit hautement inflammable	A3	B3
Produit inflammable	A2	B2
Produit légèrement inflammable	A2L	B2L
Pas de propagation de flamme	A1	B1

Beaucoup d'HFC, dont l'usage est maintenant réglementé, sont classés A1. Ils ne détruisent pas la couche d'ozone mais ont un impact plus ou moins important sur l'effet de serre.

Nécessité de les remplacer par d'autres fluides ayant un impact moindre sur l'effet de serre mais ceux-ci sont inflammables et/ou toxiques.

Demande du Ministère

Utilisation des fluides inflammables (A2L, A2 et A3) dans les équipements de conditionnement d'air (chaud, froid) et/ou de production d'eau chaude sanitaire (ECS) venant équiper un équipement recevant du public (ERP) :

Evaluer les risques

Le cas échéant, identifier les mesures supplémentaires à mettre en place si ces fluides venaient à être autorisés

Niveau d'acceptabilité des risques

Plusieurs approches sont possibles:

1. Reasonner sur le nombre d'évènements possibles (« *pas plus de X évènements par an sur l'ensemble du parc installé* »)
2. Reasonner sur la notion de risque individuel en un point donné (« *à moins de 1 m de l'équipement, la probabilité de décès ne doit pas dépasser 1 pour 1 000 000* »)
3. Utiliser une matrice d'acceptabilité du risque Gravité – Probabilité (mais travail préliminaire de définition du code couleur dans la matrice...)
4. Proposer des distances d'éloignement de telle sorte que les enjeux ne soient pas exposés aux effets attendus (approche déterministe).

L'INERIS a préféré retenir cette dernière approche:

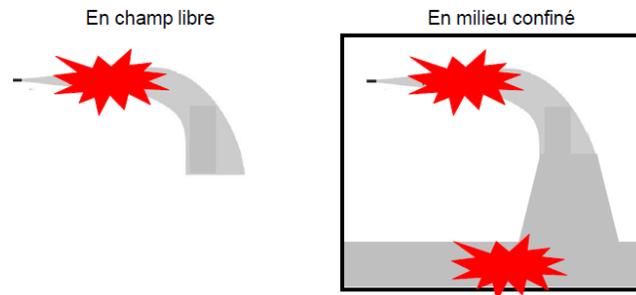
- Si éloignement impossible, d'autres mesures seront proposées
- Ces distances et ces mesures sont établies sur la base de modélisations et/ou par comparaison avec d'autres règles applicables à des installations assimilables (GZ, CNPG, NF EN 378...)

Liste des évènements redoutés

En cas de fuite accidentelle de fluide inflammable, on peut avoir :

1. Anoxie (mais risque non lié à l'inflammabilité du fluide donc déjà existant)
2. Si inflammation:
 - **Explosion** (avec effets thermiques liés à la combustion du nuage inflammable et effets de surpression liés à la propagation de la flamme dans le nuage inflammable)
 - **Feu torche** (avec effets thermiques)

L'explosion peut survenir aussi bien près de la fuite (explosion de jet) que dans le local (explosion de nappe de gaz) si ce dernier est insuffisamment ventilé et/ou peu volumineux.



Discussion non spécifique au contexte du conditionnement d'air et/ou production **EDS** **ENERIS**

Colloque des responsables départementaux prévention des services d'incendie et de secours – 1^{er} décembre 2017

ENERIS
maîtrise le risque
pour un développement durable

Stratégie

Rendre le scénario de rupture franche de tuyauterie peu probable (inaccessibilité, capotage...)

Pour les scénarios de fuite ($\leq 10\%$ DN) :

1. Protection vis-à-vis du risque de feu torche et d'explosion dans le jet (dans local et à l'extérieur)
 - Pas possible d'empêcher la formation du nuage inflammable en cas de fuite
 - Il faut empêcher la présence d'une source d'inflammation dans ce nuage (source liée à la présence humaine ou non)
 - Mise en place d'une zone d'exclusion dont le rayon varie en fonction du diamètre de la tuyauterie (cf. slide suivant)
2. Protection vis-à-vis du risque d'explosion de nappe (uniquement dans le local)
 - Possible d'éviter la formation d'une nappe inflammable en limitant la charge en fluide frigorigène
 - Ce calcul de charge maximal prend en compte la surface de l'ERP, la hauteur des installations dans l'ERP et le type de fluide.

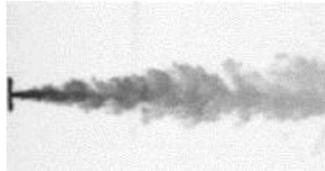
Détermination de la zone d'exclusion

Modélisation d'une fuite de plusieurs fluides classés A2L, A2 ou A3:

1. La fuite est horizontale et non impactante
2. La fuite se fait sur la phase liquide (rejet diphasique)
3. La fuite se fait à débit constant et à la pression maximale dans le circuit

De ces modélisations, il apparaît que :

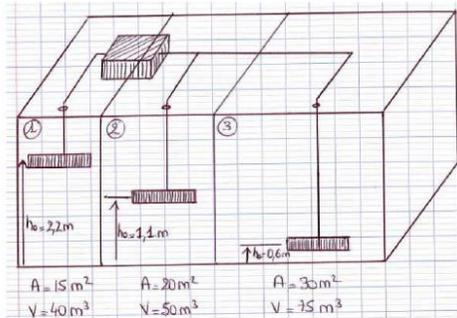
- Pour les scénarios étudiés (fuite $\leq 10\%$ DN), la taille du nuage inflammable dépend essentiellement de la taille de l'orifice et peu de la pression de rejet ou de la nature du fluide.
- Pas de nécessité à définir des zones d'exclusion différentes selon la classification du fluide
- Exemple de distance d'exclusion : 2 m pour une tuyauterie de 10 mm



Colloque des responsables départementaux prévention des services d'incendie et de secours – 1^{er} décembre 2017

Exemple d'installation

Utilisation d'un multi-split fonctionnant au R32 pour climatiser 3 chambres d'un hôtel :



Fluide utilisé pour climatisation : difluorométhane (R32) classé A2L

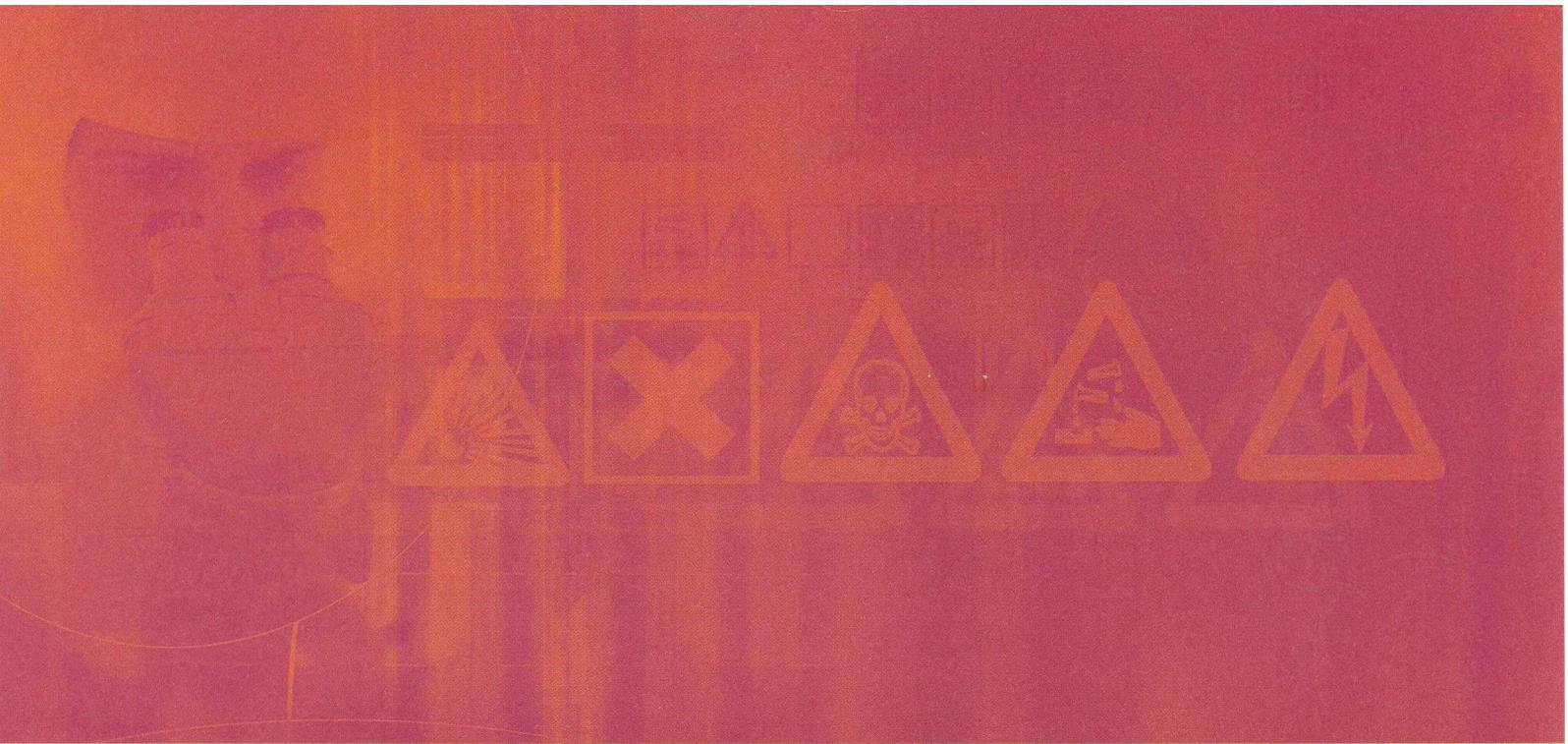
Condenseur installé sur une dalle en toiture de l'hôtel (inaccessible au public) et chaque chambre est dotée de sa propre unité terminale (= évaporateur). Le diamètre maximal est de 1/4" (6,4 mm) pour les tuyauteries HP et de 3/8" (9,5 mm) pour les tuyauteries BP.

Chambre	1	2	3
Surface A [m ²]	15	20	30
Volume V [m ³]	40	50	75
Hauteur unité terminale h _u [m]	2,2	1,1	0,6
Puissance nécessaire ¹ [kW]	1,5	2,0	3,0
Quantité de fluide nécessaire ² [kg]	0,38	0,50	0,75

Liste des prescriptions :

- En toiture :
 - Les équipements installés en toiture sont conçus et adaptés pour fonctionner à l'extérieur.
 - Le calorifuge utilisé doit être D-s1,d0. Les parois des équipements et la dalle d'assise doivent être A2-s1,d0.
 - Compte tenu du diamètre maximal des tuyauteries, il ne faut ni source possible d'inflammation, ni présence humaine dans un rayon de 2 m autour des équipements. Or, la toiture est inaccessible au public.
- Les tuyauteries circulent préférentiellement en toiture et plongent au dernier moment pour alimenter les chambres d'hôtel.
- Dans les chambres d'hôtel :
 - Limitation du nombre de raccords.
 - Protection des tuyauteries de toute agression mécanique.
 - Le calorifuge utilisé doit être A2-s1,d0
 - Pas de tuyauterie de diamètre supérieur à 10 mm.
 - Pas de source d'inflammation à moins de 2 m.
 - Calcul de la charge maximale selon l'Equation 1 : 4,90 kg pour la chambre 1, 2,81 kg pour la chambre 2 et 1,88 kg pour la chambre 3.

Colloque des responsables départementaux prévention des services d'incendie et de secours – 1^{er} décembre 2017



*maîtriser le risque |
pour un développement durable |*

Institut national de l'environnement industriel et des risques

Parc Technologique Alata
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99

E-mail : ineris@ineris.fr - **Internet :** <http://www.ineris.fr>