

**Réduction des risques
lors des interventions en espace clos**
**Développement d'une base de connaissances
sur la prévention intrinsèque
et la protection collective**

Damien Burlet-Vienney¹, Yuvin Chinniah²,
Ali Bahloul¹, Andrés Felipe González Cortés²,
Capucine Ouellet¹, Abdallah Ben Mosbah²

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1167-fr



NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

Mission

Dans l'esprit de la Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST) et de la Loi sur les accidents du travail et les maladies professionnelles (LATMP), la mission de l'IRSST est de :

Contribuer à la santé et à la sécurité des travailleuses et travailleurs par la recherche, l'expertise de ses laboratoires, ainsi que la diffusion et le transfert des connaissances, et ce, dans une perspective de prévention et de retour durables au travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement :

- au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST (preventionautravail.com)
- au bulletin électronique [InfoIRSST](#)

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2022
ISBN 978-2-89797-236-3 (PDF)

© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, 2022

IRSST - Direction des communications, de la veille et de la mobilisation des connaissances
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

Réduction des risques lors des interventions en espace clos

Développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

Damien Burette-Vienney¹, Yuvin Chinniah²,
Ali Bahloul¹, Andrés Felipe González Cortés²,
Capucine Ouellet¹, Abdallah Ben Mosbah²

1. IRSST

2. Polytechnique Montréal

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1167-fr



Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

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



ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous exprimons notre gratitude à tous les participants et toutes les entreprises/organismes qui ont été rencontrés au cours de ce projet. Sans leur collaboration, leur disponibilité et leur ouverture, la réalisation de cette étude n'aurait pas été possible. Nous soulignons leurs nombreuses suggestions pour améliorer la gestion des risques liée aux interventions en espace clos.

Nous tenons ensuite à souligner la contribution des membres des comités de suivi paritaires mis en place par l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) pour l'orientation de la recherche et l'aide lors du recrutement des participants. Nous remercions également les consultants d'Intervention Prévention inc. pour leur participation à la validation des arbres des causes ainsi que les évaluateurs du rapport qui nous ont permis d'apporter des précisions, notamment en lien avec les notions de prévention intrinsèque et de protection collective.

Enfin, l'équipe de recherche remercie l'IRSST pour le financement du projet et le soutien de son personnel tout au long du projet.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	VIII
ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	XI
INTRODUCTION	1
Mise en contexte.....	1
Concept d'« espace clos »	1
Risques et statistiques d'accidents	4
État des pratiques de réduction du risque sur le terrain.....	6
Portée de la recherche.....	7
Prévention intrinsèque et protection collective (PIPC).....	7
Objectif de la recherche	8
Structure du rapport.....	8
1. ÉTAT DES CONNAISSANCES	9
1.1 Prévention intrinsèque, protection collective et interventions en espace clos	9
1.2 Sous-principes associés à la PIPC-EC	13
1.2.1 Supprimer l'espace clos à la conception.....	14
1.2.2 Réduire le besoin d'entrer.....	14
1.2.3 Diminuer l'intensité des dangers à la conception	14
1.2.4 Moyen de protection collective à la conception.....	14
2. MÉTHODOLOGIE	16
2.1 Vue d'ensemble de la méthodologie	16
2.2 Phase 1 : Analyse a posteriori d'accidents mortels en espace clos.....	18
2.2.1 Échantillon d'accidents mortels	18
2.2.2 Technique de l'arbre des causes (AdC).....	19
2.3 Phase 2 : Consultation d'experts.....	20
2.4 Phase 3 : Études de cas et base de connaissances	22
2.4.1 Échantillon pour les études de cas	22
2.4.2 Collecte de données et analyse.....	27
2.4.3 Construction de la base de connaissances.....	28

3.	RÉSULTATS – ANALYSE A POSTERIORI D’ACCIDENTS MORTELS	30
3.1	Cas A – Intoxications	30
3.1.1	Séquence des événements	30
3.1.2	Supprimer/Réduire le besoin d’entrer	33
3.1.3	Diminuer l’intensité d’un danger et autres mesures collectives	33
3.2	Mesures de PIPC théoriques en lien avec les AdC	34
3.3	Connaissances acquises avec la méthode des AdC	37
4.	RÉSULTATS – RETOUR D’EXPÉRIENCE D’EXPERTS SUR LA MISE EN APPLICATION DE LA PIPC-EC.....	38
4.1	Déclasser un espace clos à la conception ou lors d’une modification	38
4.1.1	Élimination complète de l’espace clos	39
4.1.2	Déclassement par les risques.....	40
4.1.3	Déclassement administratif.....	40
4.2	Besoin d’entrer.....	41
4.2.1	Éliminer le besoin d’entrer	41
4.2.2	Réduire la fréquence et la durée des entrées	44
4.2.3	Améliorer l’accès, l’intervention et l’évacuation lorsque requis.....	44
4.3	Difficultés à l’adoption de mesures de PIPC et suggestions.....	46
4.4	Connaissances acquises avec les experts.....	48
5.	RÉSULTATS – ÉTUDES DE CAS ET BASE DE CONNAISSANCES.....	51
5.1	Tables constitutives de la base de connaissances	51
5.2	Tables des solutions de PIPC-EC par types d’espace clos	55
5.2.1	Chambre, trou d’homme, puits d’accès.....	56
5.2.2	Réservoir	61
5.2.3	Bassin	65
5.2.4	Cheminée.....	67
5.2.5	Intérieur d’un équipement industriel.....	67
5.3	Discussions sur la base de connaissances	70
5.3.1	Contenu de la base de connaissances	70
5.3.2	Utilisation et valorisation de la base de connaissances	73
5.3.3	Portée et limites.....	74
	CONCLUSION.....	76

BIBLIOGRAPHIE	79
ANNEXE A	89
A.1 Certificat de conformité éthique	89
ANNEXE B	90
B.1 Questionnaire pour les entrevues avec les experts (Guide d'entretien).....	90
ANNEXE C	92
C.1 Arbres des causes, accidents mortels en espace clos	92
ANNEXE D	102
D.1 Base de connaissances : contraintes techniques et organisationnelles.....	102

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Échantillon de dix accidents mortels sélectionnés.....	19
Tableau 2.	Échantillon de 15 experts en gestion des espaces clos recrutés.....	21
Tableau 3.	Description de l'échantillon de 19 études de cas.....	24
Tableau 4.	Description des espaces clos et des interventions ciblées dans les 19 études de cas	25
Tableau 5.	Mesures de PIPC issues des AdC en lien avec l'élimination de l'espace clos	34
Tableau 6.	Mesures de PIPC issues des AdC en lien avec l'élimination/la réduction du besoin d'entrer	35
Tableau 7.	Mesures de PIPC issues des AdC en lien avec la réduction du niveau de risque et l'amélioration de l'accès	36
Tableau 8.	Point de vue des experts concernant les mesures qui éliminent le besoin d'entrer pour une tâche spécifique dans un espace clos	43
Tableau 9.	Point de vue des experts concernant les mesures qui réduisent la fréquence ou la durée d'intervention en espace clos.....	45
Tableau 10.	Point de vue des experts concernant les mesures qui améliorent l'accès, l'intervention et l'évacuation	45
Tableau 11.	Facteurs favorisant et contraintes quant à l'adoption de mesures de PIPC-EC exprimés par les experts et lors des études de cas.....	46
Tableau 12.	Table des principes de PIPC-EC associés aux solutions de la base de connaissances	52
Tableau 13.	Table des types d'intervention associés aux solutions de PIPC-EC de la base de connaissances.....	52
Tableau 14.	Table des types de mesures de réduction du risque associées aux solutions de PIPC-EC de la base de connaissances.....	53
Tableau 15.	Table des caractéristiques de conception problématiques associées aux solutions de PIPC-EC de la base de connaissances.....	54
Tableau 16.	Tables des contraintes techniques et organisationnelles associées aux solutions de PIPC-EC de la base de connaissances.....	54
Tableau 17.	Solutions de la base de connaissances associées au type d'espace clos « Chambre, trou d'homme, puits d'accès ».....	58
Tableau 18.	Solutions de la base de connaissances associées au type d'espace clos « Réservoir »	63

Tableau 19.	Solutions de la base de connaissances associées au type d'espace clos « Bassin »	66
Tableau 20.	Solutions de la base de connaissances associées au type d'espace clos « Cheminée »	68
Tableau 21.	Solutions de la base de connaissances associées au type d'espace clos « Intérieur d'un équipement industriel »	69
Tableau 22.	Portrait général des solutions de la base de connaissances	71
Tableau 23.	Questionnaire utilisé pour les entrevues avec les experts	90
Tableau 24.	Détails des contraintes techniques et organisationnelles associées aux solutions de la base de connaissances	102

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Puits d'accès dans le secteur municipal.....	2
Figure 2.	Répartition des décès en espace clos au Québec entre 1998 et 2017, par type de risques (nombre de décès ; pourcentage).....	5
Figure 3.	Sous-principes associés à la prévention intrinsèque et la protection collective pour les espaces clos en exploitant les éléments nécessaires à l'apparition d'une situation dangereuse.	13
Figure 4.	Vue d'ensemble des phases du projet pour la construction d'une base de connaissances sur les mesures de PIPC-EC (adaptée de González Cortés <i>et al.</i> , 2021b).....	17
Figure 5.	Diagramme « Entité-association » associé à la base de connaissances pour les mesures de PIPC-EC.	28
Figure 6.	Entrée de la station de pompage (CNESST, 2005, EN-003536).	30
Figure 7.	AdC développé pour le cas A (Intoxications, station de pompage).....	32
Figure 8.	Types de déclassement d'un espace clos.	39
Figure 9.	Mise en œuvre des mesures de PIPC-EC pour une intervention spécifique (adaptée de González Cortés <i>et al.</i> , 2021b).....	49
Figure 10.	Vue intérieure d'un puits d'accès électrique, présence d'une 2 ^e ouverture pour le pompage de l'eau et la ventilation (ED_ID : 1; solution n° 21).....	57
Figure 11.	Vue intérieure d'une boule de bétonnière, palette intégrée à la structure pour brasser et livrer le béton (EC_ID : 12; solution n° 47).	62
Figure 12.	Base en aluminium emmanchée dans l'ouverture qui sert de support à une échelle rigide installée par section depuis le haut (EC_ID : 20; solution n° 97).	67
Figure 13.	Ouverture dans la structure de la chaudière, sans être un accès, pour permettre une inspection ou un nettoyage depuis l'extérieur (EC_ID : 18; solution n° 101).	68
Figure 14.	Outil de recherche multicritères pour identifier des solutions dans la base de connaissances.	74
Figure 15.	Arbre des causes du cas B (asphyxie ; cuve).....	93
Figure 16.	Arbre des causes du cas C (explosion ; citerne).....	94
Figure 17.	Arbre des causes du cas D (coincé par ; turbine).....	95
Figure 18.	Arbre des causes du cas E (coincé par ; mélangeur).	96

Figure 19.	Arbre des causes du cas F (chute objet ; trou de forage).	97
Figure 20.	Arbre des causes du cas G (chute de hauteur ; séchoir).	98
Figure 21.	Arbre des causes du cas H (électrocution ; plénum).	99
Figure 22.	Arbre des causes du cas I (ensevelissement ; silo à grains).	100
Figure 23.	Arbre des causes du cas J (noyade ; trou d'homme).	101

SOMMAIRE

Les espaces clos parmi les plus courants dans les milieux de travail au Québec sont les réservoirs, les cuves, les puits d'accès, les égouts, les tuyaux et les citernes. Les entrées en espace clos sont effectuées, entre autres, pour des raisons de maintenance (p. ex. : réparation, inspection, nettoyage, déblocage). Les risques pour la santé et la sécurité des travailleurs impliqués sont variés : atmosphérique, chimique, biologique, mécanique, physique ou liés à une chute ou au non-respect des principes ergonomiques. Dans le cadre de ce projet, une moyenne de 2,6 décès par an en espace clos au Québec sur la période 1998-2017 a été recensée (53 décès) en consultant les rapports d'enquête d'accidents graves et mortels de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNEST). Cela représente environ 4 % de l'ensemble des décès causés par un accident du travail sur cette période.

Le travail en espace clos au Québec est réglementé par le *Règlement en santé et en sécurité du travail* (RSST) et le *Code de sécurité pour les travaux de construction* (CSTC). La réduction des risques lors des interventions en espace clos s'effectue traditionnellement par l'émission de permis d'entrée, une ventilation naturelle et mécanique, la mesure des gaz et l'utilisation d'équipement de protection individuelle (EPI). Bien que privilégiée dans les normes et potentiellement plus efficace, la mise en place de mesures à la conception des espaces clos et l'utilisation de la protection collective semblait encore marginale dans les organisations, selon une précédente étude de l'IRSST (Chinniah *et al.*, 2016).

La présente étude s'intéresse donc aux moyens placés le plus haut dans la hiérarchie de réduction du risque pour les interventions en espace clos, c'est-à-dire les moyens pour éliminer ou réduire les risques à la source ainsi que les mesures de protection collective. Dans ce projet, à des fins de simplification, ces notions ont été regroupées sous le terme « prévention intrinsèque et protection collective » (PIPC) pour les espaces clos. Cela inclut toutes les mesures mises en place lors de la conception de l'espace clos ou lors de sa modification (c.-à-d. réingénierie, rétrofit) et qui permettent de réduire les risques pour l'ensemble des personnes qui interviennent (p. ex. point d'intervention déplacé à l'extérieur de l'espace clos pour éviter l'entrée).

Considérant que les connaissances existantes dans la littérature et dans la pratique sur le terrain ne sont pas structurées, l'objectif de cette étude consistait à bâtir une base de connaissances sur les mesures de PIPC pour réduire les risques lors des interventions en espace clos. Cette base de connaissances inclut un agencement des différents principes de réduction du risque mis en œuvre ainsi que des informations sur l'environnement, le contexte d'opérations, les effets envisagés sur la réduction du risque et les contraintes techniques et organisationnelles à prendre en compte. Afin de bâtir cette base de connaissances, une méthodologie en trois phases a été utilisée.

Lors de la phase 1 du projet, dix accidents mortels en espace clos ont été analysés avec la technique de l'arbre des causes (AdC). Cette analyse a permis d'identifier les causes primaires des accidents en lien avec des lacunes de conception et de démontrer le potentiel des mesures de PIPC dans ce contexte.

Lors de la phase 2, quinze experts en gestion des risques pour les espaces clos (p. ex. : formateur, consultant, préventeur en industrie, concepteur côté client) ont été consultés sur l'implantation et sur l'utilisation des mesures de PIPC. Les facteurs favorisant et les contraintes exprimés par les experts quant à l'adoption des mesures de PIPC sur le terrain ont ainsi été recensés. À ce sujet, une prise en compte de l'ensemble du cycle de vie de l'espace clos par le concepteur, une planification à long terme des investissements par l'utilisateur et un engagement dans la relation concepteur-utilisateur concernant la SST sont ressortis comme étant des leviers importants. Cette phase de l'étude a également permis de proposer un modèle à l'intention des concepteurs et des utilisateurs qui structure les mesures de PIPC pour les espaces clos selon les principes suivants : P1) éliminer complètement l'espace ; P2) déclasser l'espace clos en travaillant sur les risques ; P3) supprimer la nécessité d'entrer pour effectuer une tâche spécifique ; P4) réduire le besoin d'entrer de manière générale ; P5) améliorer l'accès, l'intervention et l'évacuation. À noter qu'une démarche de réduction du risque devrait toujours s'appuyer sur une démarche complète d'évaluation du risque et non seulement sur une approche de conformité réglementaire (p. ex. définition d'un espace clos).

Finalement, lors de la phase 3 du projet, 19 études de cas en entreprise ont été effectuées afin de recenser les mesures de PIPC utilisées ou qui pourraient l'être pour des interventions réelles ciblées. Les secteurs d'activités inclus dans l'échantillon ont été ceux du traitement des eaux, de la distribution électrique/télécommunication, des pâtes et papiers, de la fabrication de pièces, du traitement chimique, du transport et de la maintenance industrielle/génie civil. Afin d'exploiter les 112 solutions recensées en lien avec 30 espaces clos, une base de données relationnelle interrogeable a été développée. Chaque solution a été associée dans la base de connaissances à un contexte (c.-à-d. espace clos, intervention), à une problématique (c.-à-d. risques, caractéristiques de conception problématiques), à un mécanisme de réduction du risque (c.-à-d. principes P1 à P5, types de mesures) et à des contraintes d'implantation (c.-à-d. techniques, organisationnelles). Les solutions sont présentées dans ce rapport en premier lieu par type d'espace clos (c.-à-d. réservoir, bassin, puits d'accès/chambre, cheminée, intérieur d'un équipement industriel) et elles sont regroupées comme suit : 6 % des solutions portent sur les principes P1 et P2, 54 % sur les principes P3 et P4 et 40 % sur le principe P5. Les options concernant P1 et P2 sont limitées, notamment à cause du fait que les participants se sont d'abord placés dans un contexte de modification de l'existant (P3 à P5). Des travaux de recherche spécifiquement avec des fabricants d'espaces clos pourraient permettre de combler cette limite.

Enfin, cette base de connaissances et les AdC développés devront faire l'objet d'une activité de valorisation afin de fournir aux utilisateurs un accès interactif à l'ensemble des données. La diffusion de la base de connaissances contribuera à sensibiliser les concepteurs, les intégrateurs et les préventeurs à l'importance et aux opportunités de réduire les risques en espace clos en se basant sur la PIPC.

ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Acronyme	Définition
AdC	Arbre des causes
AIHA	American Industrial Hygiene Association
ANSI	American National Standards Institute
APR	Appareil de protection respiratoire
APSAM	Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail, secteur « Affaires municipales »
ASSE	American Society of Safety Engineers
ASP	Association sectorielle paritaire
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
CCPS	Center for Chemical Process Safety
CNESST	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
CSA	Association canadienne de normalisation
CSTC	<i>Code de sécurité pour les travaux de construction</i>
EA	Entité-association
EC	Espace clos
EPI	Équipement de protection individuelle
HSE	Health and Safety Executive
IoT	<i>Internet of Things</i>
INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques
INRS	Institut national de recherche et de sécurité
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
ISD	<i>Inherently Safer Design</i>
ISO	International Organization for Standardization
LSST	<i>Loi sur la santé et la sécurité du travail</i>
MÉLITO	Moment, équipement/outil, lieu, individu, tâche, organisation du travail
NFPA	National Fire Protection Association
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
PIPC	Prévention intrinsèque et protection collective

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

PIPC-EC	Prévention intrinsèque et protection collective pour les interventions en espace clos
PtD	<i>Prevention through Design</i>
REX	Retour d'expérience
RCSST	<i>Règlement canadien sur la santé et la sécurité du travail</i>
RSST	<i>Règlement sur la santé et la sécurité du travail</i>
SST	Santé et sécurité du travail

INTRODUCTION

Au moment de la remise de ce rapport, deux articles en lien avec ce projet de recherche ont été publiés dans le cadre du doctorat d'Andrés González Cortés à Polytechnique Montréal (González Cortés *et al.*, 2021a ; 2021b). Plusieurs références à ces deux articles ont été faites tout au long du rapport.

Mise en contexte

Concept d'« espace clos »

Au Québec, l'article 1 du *Règlement sur la santé et la sécurité du travail* (RSST) définit les conditions générales pour qu'un lieu soit considéré comme un espace clos (RLRQ c. S-2.1, r. 13). Pour être considéré comme un espace clos au moment de la rédaction de ce rapport¹, un lieu doit réunir les quatre conditions suivantes :

1. l'espace doit être totalement ou partiellement fermé ;
2. il n'est pas conçu pour être occupé par des personnes ni destiné à l'être, mais qui à l'occasion peut être occupé pour l'exécution d'un travail ;
3. on ne peut y accéder ou on ne peut en ressortir que par une voie restreinte ;
4. il peut présenter des risques pour la santé, la sécurité ou l'intégrité physique pour quiconque y pénètre.

Les différents règlements et normes sur le travail en espaces clos à travers le monde (p. ex. : normes américaine ANSI Z117.1-2016, canadienne CSA Z1006-16 et australienne AS/NZ 2865-2009; règlements du Royaume-Uni 1997 No. 1713 et de l'Ontario 632/05) partagent la plupart des conditions évoquées dans le RSST même si les approches peuvent légèrement différer (American National Standards Institute/American Society of Safety Engineers [ANSI et ASSE], 2016; Association canadienne de normalisation [CSA], 2016; Standards Australia, 2009; Government of United Kingdom,

¹ Lors de l'évaluation du présent rapport au début 2022, un projet de règlement visant à modifier le RSST concernant le travail en espace clos a été publié dans la Gazette officielle du Québec (2022). Ce projet de règlement propose notamment : (i) de remplacer la définition d'un espace clos par une définition ciblant davantage certains risques (intoxication, asphyxie, ensevelissement, noyade), (ii) de prévoir un aménagement qui favorise le travail depuis l'extérieur ou le contrôle des risques lors de la construction de nouveaux espaces clos ou lors de rénovation (ce qui va dans le sens du présent rapport de recherche), (iii) la mise à jour de certaines dispositions concernant la concentration minimale d'oxygène, la concentration maximale de gaz ou de vapeurs inflammables, le rôle des surveillants, le plan de sauvetage, etc. Une analyse d'impact réglementaire a été publiée par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST, 2021) en lien avec ce projet réglementaire.

1997; *Occupational Health and Safety Act*, RSO c. O.1, r. 632/05). Par exemple, certaines réglementations ciblent des dangers spécifiques (p. ex. : atmosphérique², ensevelissement, noyade) alors que d'autres sont moins restrictives sur ce point. Dans ce sens, Botti *et al.* (2017b) se sont concentrés sur la problématique de l'identification des espaces clos pour aider les professionnels en santé et en sécurité du travail (SST). Une comparaison de définitions par juridiction a également été effectuée par Amin *et al.* (2018) dans le but d'harmoniser et d'améliorer les réglementations existantes.

Au Québec, les espaces clos parmi les plus courants sont les réservoirs, les cuves, les puits d'accès (figure 1), les égouts, les tuyaux et les citernes. Le travail en espace clos est une problématique transversale dans les milieux de travail. Il concerne à la fois le secteur municipal, manufacturier, chimique, de la construction, du transport, etc. (Rekus, 1994). Les entrées en espace clos sont effectuées, entre autres, pour des raisons de maintenance (p. ex. : réparation, inspection, nettoyage, déblocage) et de fabrication (p. ex. : fabrication de navire, d'ailes d'avion). En 2020, 16 000 établissements et 1 000 municipalités au Québec avaient des espaces clos à gérer selon la CNESST dans son analyse d'impact réglementaire (CNESST, 2021). Toujours selon cette même source, près de 375 nouveaux espaces clos seraient construits annuellement au Québec. Aux États-Unis, il a été évalué que plus de 2 millions de travailleurs pénètrent chaque année dans des espaces clos identifiés (Koester, 2018).

Figure 1. Puits d'accès dans le secteur municipal.



² Définition d'« espace clos » du règlement de l'Ontario : « Espace totalement ou partiellement fermé qui réunit les conditions suivantes : a) il ne s'agit pas d'un espace à la fois conçu et construit en vue d'être occupé par des personnes de façon continue ; b) il peut présenter des risques atmosphériques en raison de sa construction, de son emplacement, de son contenu ou du travail qui y est exécuté. (*Occupational Health and safety Act*, RSO c. O.1, r. 632/05)

D'un point de vue réglementaire, les employeurs au Québec ont l'obligation de respecter la section XXVI du RSST ou la section 3.21 du *Code de sécurité pour les travaux de construction* (CSTC) pour un chantier de construction afin d'intervenir dans un espace clos (RLRQ c. S-2.1, r. 13; RLRQ c. S-2.1, r. 4). Si on prend l'exemple du RSST, ce règlement prescrit les obligations suivantes³ :

- interventions en espace clos réservées aux travailleurs habilités ;
- cueillette de renseignements et information des travailleurs préalable à l'exécution d'un travail ;
- ventilation (naturelle ou mécanique) de l'espace afin de maintenir des conditions atmosphériques respectant les limites établies par le règlement. Port d'appareil de protection respiratoire (APR) si la ventilation n'est pas suffisante ;
- maîtrise des risques d'explosion issus des poussières combustibles ;
- contrôle des conditions atmosphériques et des poussières combustibles et mesure en continu des gaz et vapeurs inflammables lors d'un travail à chaud dans l'espace clos ;
- mesure des gaz et relevés avant chaque entrée dans l'espace clos et si les circonstances le commandent ;
- surveillance des travailleurs qui pénètrent dans l'espace clos ;
- élaboration et validation d'un plan de sauvetage ;
- moyens de protection individuels ou collectifs qui ne nuisent pas aux entrées et sorties de l'espace clos ;
- les mesures de contrôle lorsque l'espace clos contient des matières à écoulement libre (solide ou liquide).

La réglementation décrit les exigences minimales. Par exemple, elle ne fait pas référence à une méthode d'appréciation du risque spécifique ou un modèle de permis d'entrée. Dans ce contexte, la norme canadienne CSA Z1006-16 et la norme américaine ANSI/ASSE : Z117.1-2016 relatives aux espaces clos sont une source d'information

³ La proposition réglementaire ajoute une nouvelle obligation : pour un nouvel espace clos, ou lors de la rénovation d'espaces clos existants, prévoir les aménagements nécessaires afin de favoriser le travail depuis l'extérieur et le contrôle efficace des risques (Gazette officielle du Québec, 2022).

complémentaire⁴. Elles donnent des balises en ce qui a trait au programme de gestion à mettre en place et aux rôles et responsabilités des intervenants (CSA, 2016 ; ANSI et ASSE, 2016). D'autre part, ces normes précisent les étapes du processus d'identification et d'évaluation du risque, tout en facilitant la prise de décision sur la sélection et l'application des mesures de prévention. Elles détaillent aussi les exigences préalables liées aux opérations de sauvetage, les contenus du programme de formation et les pratiques de suivi et de documentation en matière d'audit.

Éliminer le risque à la source est traditionnellement considérée comme l'approche la plus efficace (Khan *et al.*, 2015 ; Rayner Brown *et al.*, 2021 ; Athar *et al.*, 2019 ; Kletz, 2003 ; Lyon et Popov, 2019). Le présent rapport de recherche s'inscrit dans cette approche. Plus de détails sur cette notion appliquée aux interventions en espace clos sont disponibles au chapitre 1.

Risques et statistiques d'accidents

Les risques en espace clos pour la santé et la sécurité des travailleurs sont variés : atmosphérique (p. ex. : asphyxie, intoxication, explosion), chimique (p. ex. produits dangereux), biologique (p. ex. : animaux, seringues souillées, moisissures, microorganismes), chute, mécanique (p. ex. pièce en mouvement), physique (p. ex. : électrique, rayonnement, ensevelissement) ou liés au non-respect des principes ergonomiques (p. ex. : postures contraignantes, espace de travail restreint) (Burllet-Vienney *et al.*, 2015b ; Trudel et Gilbert, 2000 ; Rekus, 1994 ; McManus et Haddad, 2016 ; Work Safe BC, 2013). Ils peuvent provenir de l'espace clos en lui-même, de l'environnement ou des travaux à exécuter. Les risques en espace clos sont potentiellement élevés à cause du confinement, de la ventilation naturelle déficiente, du travail isolé, et des difficultés d'accès, de sauvetage et de communication (CSA, 2016 ; Pettit et Linn, 1987). L'appréciation des risques en espace clos nécessite d'ailleurs une approche pluridisciplinaire (Burllet-Vienney *et al.*, 2014).

Malgré les obligations réglementaires en place et les normes disponibles, les accidents mortels liés au travail en espace clos sont encore fréquents. Selon une estimation de la CNESST, en se basant sur les travaux de Lebeau *et al.* (2014), les décès et les accidents graves en espace clos au Québec entre 2016 et 2020 ont coûté en moyenne chaque année près de 9 M\$ aux entreprises et à la société québécoise en coûts humains et monétaires (CNESST, 2021). Dans le cadre de ce projet, en consultant les rapports d'enquête d'accidents graves et mortels de la CNESST, une moyenne de 2,6 décès par an en espace clos au Québec sur la période 1998-2017 a été recensée. Ces chiffres sont

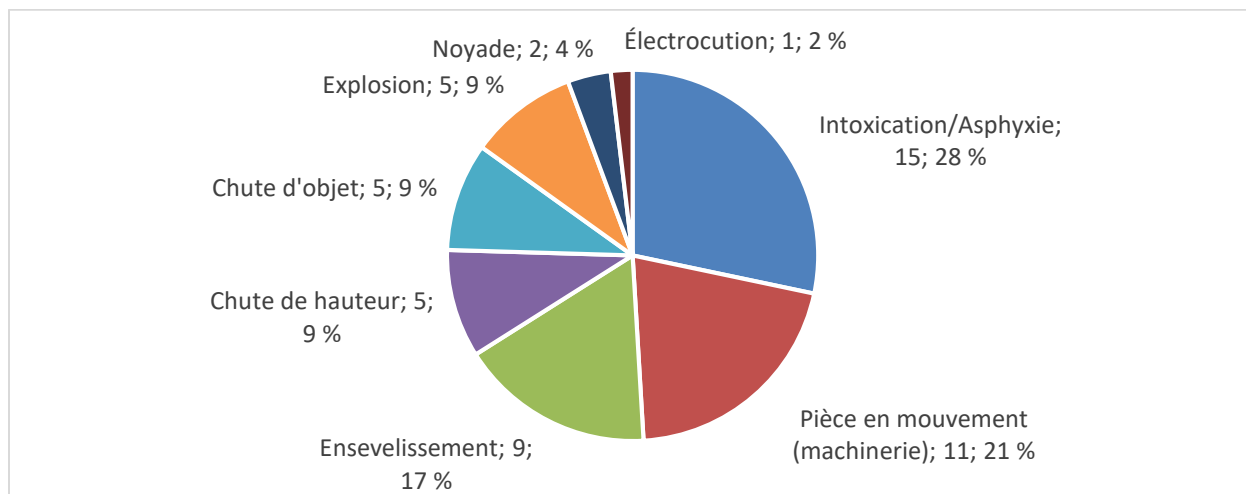
⁴ Le RSST ou le CSTC reste toutefois la référence du législateur au Québec puisque la norme CSA Z1006 n'est pas citée dans la réglementation.

une mise à jour de Chinniah *et al.* (2016) pour la période 1998-2011 (cf. section 2.2.1 pour de détails méthodologiques).

Cette moyenne représente concrètement 53 décès en espace clos au Québec sur la période 1998-2017. Il s'agit d'un minimum, car certains accidents mortels ne sont pas enquêtés, notamment dans le secteur agricole. Cela représente environ 4 % de l'ensemble des décès au Québec suite à un accident du travail ou encore un taux approximatif de 0,07 décès par 100 000 travailleurs (González Cortés *et al.*, 2021a). Ce taux est équivalent à ceux des États-Unis (0,07 ; au moins 1 030 décès entre 2011 et 2018) et de l'Australie (0,05 ; au moins 59 décès entre 2000 et 2012) (Selman *et al.*, 2017; U.S. Bureau of Labor Statistics, 2021; Wang et Zhao, 2021).

La figure 2 présente la répartition des 53 décès en espace clos au Québec sur la période 1998-2017 par type de risque. Cette répartition est assez similaire à celle de la période 1998-2011 (Chinniah *et al.*, 2016). Les intoxications et les asphyxies constituent toujours la première cause de décès dans les espaces clos (28 %). La plupart des victimes ont été exposées à du sulfure d'hydrogène (H₂S), un gaz que l'on retrouve en présence de matières en décomposition ou de résidus organiques dans le traitement des eaux usées, les fosses agricoles ou lors de processus industriels dans le secteur chimique. La deuxième cause de décès est reliée à la présence de pièces en mouvement (21 %). Ce type d'accident est largement relié à une déficience dans la maîtrise des énergies dangereuses (p. ex. cadenassage) avant l'entrée dans l'espace clos. Les autres types d'accidents sont les ensevelissements, les chutes de hauteur, les chutes d'objet et les explosions. Chinniah *et al.* (2016) présente plusieurs statistiques d'accidents issues de la littérature. Les dangers atmosphériques sont également mis de l'avant.

Figure 2. Répartition des décès en espace clos au Québec entre 1998 et 2017, par type de risques (nombre de décès ; pourcentage).



État des pratiques de réduction du risque sur le terrain

Un précédent projet de recherche a été mené à l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) en collaboration avec Polytechnique Montréal sur l'analyse du risque pour les interventions en espace clos. En effet, l'analyse du risque est la première étape dans une démarche de réduction du risque. Les résultats de cette étude basée sur une approche multidisciplinaire ont été publiés dans le rapport R-928, intitulé *Développement d'un outil d'analyse du risque et de catégorisation des interventions en espace clos* (Chinniah *et al.*, 2016) ainsi que dans plusieurs articles scientifiques (Burllet-Vienney *et al.*, 2014 ; 2015a ; 2015b ; 2016). Un outil d'analyse du risque dédié aux espaces clos a été développé au cours de ce projet afin de combler certaines lacunes comme : (i) l'exhaustivité et la multidisciplinarité de l'identification des risques ; (ii) l'étape d'estimation du risque ; (iii) l'exploitation et la communication des résultats de l'analyse du risque. L'outil Web développé sur les bases de la recherche (E.CLOS) permet aux entreprises d'effectuer, de sauvegarder et de modifier des analyses du risque pour leurs espaces clos et les interventions reliées. L'outil génère ainsi l'information pertinente pour l'étape de réduction du risque et à la préparation de documents tels un permis d'entrée, un audit ou un appel d'offres, et contribue à faire preuve de diligence raisonnable.

Dans ce précédent projet de recherche (Chinniah *et al.*, 2016), des éléments en lien avec la réduction du risque ont été recueillis auprès de 15 entreprises. Ces entreprises couvraient des secteurs d'activités variés comme la production énergie, l'administration publique, la fabrication d'équipement, le transport et la construction. Les espaces clos observés ont été, notamment des réservoirs, des puits d'accès, des citernes de camion, des bassins de placage et des chambres de vanne. Onze des entreprises de l'échantillon avaient un programme de gestion des entrées en espace clos depuis plus de cinq ans. Il a été constaté au cours de l'étude que la réduction des risques lors des interventions en espace clos s'effectue majoritairement par des permis de travail, des mesures de gaz, une ventilation temporaire et l'utilisation d'équipements de protection individuelle (EPI) tels que les APR et les dispositifs de protection contre les chutes (p. ex. harnais). Un certain nombre de difficultés ou d'erreurs par rapport aux règles de l'art ont pu être observées au cours de ces visites (p. ex. : pas de mesures de gaz, cartouches pour les APR mal entreposées, temps de ventilation insuffisant), confirmant que l'efficacité réelle de telles mesures peut être diminuée. D'ailleurs, lors du processus de révision de la partie XI (Espace clos) du *Règlement canadien sur la santé et la sécurité du travail* (RCSST), il a été constaté « un manque de clarté de différentes dispositions réglementaires compliquant la conformité pour les employeurs et les employés » (Dubreuil, 2021).

L'application de procédures et l'utilisation d'EPI sont d'ailleurs placées en bas dans la hiérarchie des moyens de prévention présentée dans les normes en gestion du risque. La hiérarchie des moyens de prévention est une approche systémique pour contrôler et réduire les risques en privilégiant l'élimination, la substitution et les contrôles techniques.

Par la suite, les risques résiduels doivent être gérés à l'aide de systèmes d'avertissement, de contrôles administratifs et d'EPI (International Organization for Standardization [ISO], 2010 ; ANSI et ASSE, 2011). Chinniah *et al.* (2016, tableau 25) offre d'ailleurs une application des principes de cette hiérarchie au contexte des espaces clos. La mise en place de principes comme l'élimination à source ou à l'intégration de dispositifs d'ingénierie, considérés comme plus efficaces, était peu privilégiée sur le terrain à ce moment-là. Ce constat va dans le sens de ce qui a été mis en évidence de manière générale dans de nombreux milieux de travail concernant l'élimination à la source (p. ex. : Pisman et Fabiano, 2021 ; Windapo *et al.*, 2014).

Devant ces données, la nécessité de poursuivre les travaux de recherche sur le thème des espaces clos et de la réduction du risque s'est imposée.

Portée de la recherche

Prévention intrinsèque et protection collective (PIPC)

Les travaux de recherche présentés dans ce rapport s'inscrivent dans les orientations de l'article 2 de la *Loi sur la santé et la sécurité du travail* (LSST) en ce qui a trait à la réduction des risques à la source (RLRQ c. S-2.1). Ce projet de recherche s'intéresse aux moyens placés le plus haut dans la hiérarchie de réduction du risque pour les interventions en espace clos (EC), c'est-à-dire les moyens pour éliminer et réduire les risques à la source ainsi que les mesures de protection collective. Dans ce projet, à des fins de simplification, ces notions ont été regroupées sous le terme « prévention intrinsèque et protection collective » (PIPC).

Une mesure de prévention intrinsèque « élimine les phénomènes dangereux ou réduit les risques associés par un choix judicieux des caractéristiques de conception de la machine proprement dite et/ou du mode d'interaction entre les personnes exposées et la machine » (ISO, 2010). On peut penser par exemple à déplacer le point d'intervention potentiel à l'extérieur de l'espace clos pour éviter l'entrée. C'est ce type de mesures que l'on vise en premier dans ce projet.

Une mesure de protection collective est une mesure de protection qui limite l'exposition au danger pour l'ensemble des intervenants. « Ces mesures sont mises en place lorsque les mesures de prévention portant sur l'élimination ou la réduction du risque ne sont pas suffisantes » (Institut national de recherche et de sécurité [INRS], 2014). Cela peut être une protection par éloignement (p. ex. rester en dehors de l'espace clos), par obstacle (p. ex. garde-corps), par atténuation de nuisance (p. ex. ventilation optimisée) ou encore par contrôle des énergies dangereuses (p. ex. protecteur avec verrouillage).

Ainsi, on entend par PIPC toutes les mesures mises en place lors de la conception ou lors de modifications (c.-à-d. réingénierie, rétrofit) et qui permettent de réduire les risques pour

l'ensemble des personnes qui interviennent (en opposition aux EPI). L'objectif derrière la définition de PIPC est de couvrir des mesures comme l'élimination de l'espace clos, mais aussi d'intégrer toutes les mesures qui permettent de réduire le besoin d'entrer dans l'espace clos si on ne peut l'éliminer, ainsi que les mesures visant à contrôler les risques résiduels (le cas échéant). Les mesures de prévention intrinsèque et de protection collective pour les espaces clos sont notées PIPC-EC dans la suite du rapport.

Objectif de la recherche

L'objectif de cette étude a été de bâtir une base de connaissances sur les mesures de PIPC pour réduire les risques lors des interventions en espaces clos. Le concept de PIPC-EC est défini précédemment. Cette base de connaissances inclut un agencement des différents principes mis en œuvre ainsi que des informations, pour chaque solution évoquée, sur l'environnement et le contexte d'opérations, les effets envisagés sur la réduction du risque et les contraintes techniques et organisationnelles à prendre en compte. Les solutions évoquées sont ainsi associées à un contexte d'utilisation et rattachées aux contraintes présentes en milieu de travail.

Pour y parvenir, les sous-objectifs suivants ont été fixés : 1) faire un recensement et un bilan critique des mesures de PIPC pour réduire les risques lors des interventions en espaces clos ; 2) déterminer sur des cas réels en entreprise dans différents secteurs d'activités les modalités d'application de ces mesures (p. ex. : conditions, limites). Ces sous-objectifs sont en relation avec les étapes de la méthodologie (section 2.1).

Finalement, les types d'espace clos et les interventions à effectuer étant très diversifiés, ce projet de recherche n'abordera pas directement toutes les situations de travail ni tous les secteurs d'activité malgré l'approche multisectorielle utilisée. Aussi, les connaissances développées pour les types d'espace clos ciblés peuvent servir de base de réflexion pour aborder les cas non directement traités. Les résultats peuvent servir autant à éliminer ou réduire les risques pour de nouveaux espaces clos que pour des espaces clos existants.

Structure du rapport

Un bref état des connaissances en lien avec la PIPC-EC est présenté au chapitre 1. La méthodologie de recherche en trois phases est détaillée au chapitre 2. Les résultats sont présentés au chapitre 3 pour l'analyse a posteriori d'accidents mortels, au chapitre 4 pour le retour d'expérience d'experts sur la mise en application de la PIPC-EC et au chapitre 5 pour les études de cas et la base de connaissances. Un dernier chapitre présente la conclusion de ce rapport.

1. ÉTAT DES CONNAISSANCES

Une revue de la littérature spécifique à la prévention intrinsèque et la protection collective pour les espaces clos a été menée. Des documents tels que les normes, les articles scientifiques, les rapports techniques et la littérature non évaluée par des pairs (p. ex. sites Web de fabricants) ont été recensés. La documentation non évaluée par des pairs s'est avérée être une source d'information complémentaire et riche pour le suivi des innovations technologiques. La revue de la littérature a été réalisée en consultant les bases de données COMPENDEX et PUBMED de 1997-2021. Les répertoires de plusieurs organismes tels que le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH, États-Unis), l'INRS (France), le Health and Safety Executive (HSE, UK) et WorkSafe BC (Canada) ont également été consultés. Les thèmes utilisés pour les mots clés utilisés ont été : 1) espace clos (confiné) ; 2) conception ; 3) protection collective ; (4) équipements industriels. La recherche s'est limitée aux sources de langue anglaise et française.

1.1 Prévention intrinsèque, protection collective et interventions en espace clos

En SST, le processus de réduction du risque doit être précédé par une évaluation du risque (ISO, 2010). C'est dans cet esprit que l'outil d'analyse du risque E.CLOS a été développé lors d'un précédent projet afin d'identifier les risques liés à l'espace clos, son environnement et les interventions (Chinniah *et al.*, 2016). Cette étape permet de prioriser les actions à prendre en matière de réduction du risque. Comme mentionné à la section *État des pratiques de réduction du risque sur le terrain* (p. 6), il faut prioriser les mesures de prévention intrinsèque et les mesures de protection collective avant les mesures de protection individuelle (ISO, 2010 ; Lyon et Popov, 2019 ; Journal officiel de l'Union européenne, 1989). Ce projet porte spécifiquement sur la prévention intrinsèque et la protection collective telles que définies à la section *Portée de la recherche* (p. 7).

La prévention intrinsèque peut être définie comme étant l'intégration de l'appréciation du risque tôt dans les étapes de conception et d'ingénierie, ainsi que la prise d'action nécessaire pour éliminer ou réduire les risques à un niveau acceptable (Kletz, 2003). Ce concept de prévention est celui qui a le plus de potentiel et qui est privilégié dans les normes et règlements en SST. La norme américaine ANSI/ASSE Z590.3-2011 est une norme spécifique sur ce principe de prévention nommé *Prevention through Design* (PtD) (ANSI et ASSE, 2011). Les principes d'action sur le risque sont l'élimination/la réduction, la substitution, l'atténuation et la simplification à la conception. Dans des domaines comme l'industrie chimique, on fait également référence au concept d'*Inherently Safer Design* (ISD) qui vise plus spécifiquement à éviter de créer des risques dans le procédé à l'étape de la conception (Khan *et al.* 2015). Ce concept a attiré l'attention dans l'industrie et en recherche dans le but notamment d'atteindre des niveaux de performance plus élevés à la fois en matière de production et de conception d'équipements (Khan *et al.* 2015 ; Rayner Brown *et al.* 2021 ; Athar *et al.* 2019). Or, dans une étude récente,

Gambatese *et al.* (2017) révèlent que bien qu'intégrer la prévention à la conception permette aux entreprises de concevoir des infrastructures plus simples et plus rentables, de nombreux propriétaires d'entreprise sont encore réticents à changer leurs manières de faire. Cela représente l'un des obstacles les plus critiques à l'adoption des principes de la prévention intrinsèque. En conséquence, des efforts continus sont encore nécessaires pour accroître la sensibilisation à la prévention intrinsèque et à ses avantages (Gambatese *et al.*, 2017 ; Hendershot, 2011 ; Kletz, 2003 ; Zainal Abidin *et al.*, 2018).

Dans le contexte des espaces clos, le fait que les mesures relatives à la prévention intrinsèque et la protection collective soient peu exploitées par les entreprises (*État des pratiques de réduction du risque sur le terrain sur le terrain* p. 6) peut s'expliquer a priori par : (1) le manque de connaissances et d'expérience sur la mise en place de telles mesures, (2) l'habitude de procéder avec des moyens temporaires (p. ex. EPI) et (3) l'anticipation d'un travail d'innovation coûteux et peu applicable, ou une approche coût/bénéfice à court terme (Gupta et Edwards, 2002). La question des facteurs favorisant et des contraintes quant à l'adoption de mesures relatives à la PIPC a été explorée lors de la présente étude (section 4.3).

Lors du précédent projet de recherche, une revue de la littérature a été effectuée sur la gestion du risque en espace clos (Burllet-Vienney *et al.*, 2014). Au total, 77 publications ont été retenues soit : (i) 4 normes ; (ii) 15 articles scientifiques ; (iii) 7 règlements ; (iv) 9 rapports scientifiques ; (v) 5 livres ; (vi) 37 guides techniques ou codes de pratique. Les sujets les plus traités dans la littérature étaient :

- l'identification des espaces clos (c.-à-d. interprétation des règlements) ;
- l'analyse d'accidents graves (p. ex. Riedel et Field, 2013) ;
- l'identification et le contrôle des dangers atmosphériques (p. ex. : INRS, 2015 ; Flynn et Susi, 2009 ; Svedberg *et al.*, 2009) ;
- la gestion globale des risques et des procédures d'entrée (p. ex. : Caisse nationale de l'assurance maladie des travailleurs salariés, 2010 ; INRS, 2014 ; INRS et Fédération Nationale des Syndicats de l'Assainissement et de la Maintenance Industrielle, 2010 ; Pettit et Linn, 1987 ; WorkSafe BC, 2013).

Concernant les moyens de réduction du risque, la ventilation, la protection respiratoire, les mesures de gaz et les EPI de manière générale étaient largement ciblés, comme sur le terrain (Burllet-Vienney *et al.*, 2014). D'ailleurs, dans seulement deux rapports d'enquête d'accident mortel sur les 14 identifiés pour la période allant de 2011 à 2017, des recommandations en lien avec des modifications de conception ont été émises par les inspecteurs de la CNESST. La prévention intrinsèque pour les espaces clos et la question du réel besoin d'entrée dans l'espace clos sont principalement abordées dans les normes.

Sur ce point, on peut citer l'annexe A.3 de la norme canadienne CSA Z1006, avec les éléments à prendre en considération au moment de la conception (CSA, 2016), l'annexe D de la norme australienne AS/NZ 2865:2009 (Standards Australia, 2009) et la norme ANSI/ASSE Z117.1-2009 (ANSI et ASSE, 2009). Un guide de l'American Industrial Hygiene Association (AIHA) est également disponible (AIHA, 2014) tout comme un guide de l'INRS sur la conception des postes de relèvement des eaux (INRS *et al.*, 2010). Par exemple, dans la norme ANSI/ASSE Z117.1, on retrouve la mise en garde suivante : « *The failure to incorporate safety during the design process and overlooked design deficiencies can often increase the risk for entrants* » (traduction libre : ne pas intégrer la notion de sécurité au cours du processus de conception et négliger des défauts de conception peuvent augmenter le risque pour les entrants) (ANSI et ASSE, 2016). La norme CSA Z1006 précise de son côté que : « Pour les espaces clos, une conception sécuritaire est une conception (i) qui ne crée pas d'espace clos, ou bien (ii) qui permet de réaliser les opérations de maintenance et d'inspection sans rentrer dans l'espace clos, ou encore (iii) qui réduit les facteurs de risques » (CSA, 2016). Cette norme présente aussi à la section A4 des moyens de protection collective qui pourraient être utilisés dans le but d'éviter l'exécution des activités de maintenance, inspection ou nettoyage dans un espace clos. De tels moyens comprennent notamment l'automatisation des activités en utilisant des équipements spécialisés ou des robots. Parmi les exemples cités dans les normes, on retrouve (CSA, 2016) :

- effectuer l'échantillonnage de l'atmosphère de l'extérieur de l'espace clos en utilisant de longs outils comme les sondes ;
- effectuer le nettoyage de l'extérieur de l'espace clos en utilisant des méthodes alternatives comme le nettoyage chimique ou en utilisant des machines à jet d'eau automatique, des machines à la vapeur ou des systèmes de nettoyage en place (intégré à l'installation lors de la conception) ;
- décoller les accumulations de matière (p. ex. des colmatages) au sein des espaces clos en utilisant des systèmes à l'air comprimé ou des systèmes vibrants actionnés à distance ;
- effectuer les tâches d'inspection en restant à l'extérieur en utilisant des moyens tels que : les hublots, des caméras en circuit fermé ou des équipements d'inspection à distance (p. ex. : robot équipé de caméra, endoscopes).

Dans la littérature scientifique, quelques exemples concrets ont pu être recensés. Certaines études ont exploré l'intégration de modèles mathématiques ou l'utilisation de contrôles techniques pour les risques atmosphériques en espace clos. Stefana *et al.* (2021) proposent un outil qui prédit et évalue le risque de carence en oxygène lors de la conception de nouveaux procédés ou lors d'événements imprévisibles. Toujours concernant les risques atmosphériques, le Center for Chemical Process Safety (CCPS) a

publié quelques exemples de conception pour réduire les risques en espace clos. On peut citer le fait de placer les conduites d'alimentation en azote (utilisées pour purger l'atmosphère avant l'entrée) en travers de l'entrée afin de rendre impossible l'ouverture de la trappe sans avoir préalablement débranché le tuyau d'alimentation en azote (CCPS, 2008).

Botti *et al.* (2016) à l'Université de Bologne en Italie ont pour leur part recensé des technologies qui permettent d'automatiser des interventions d'inspection, de nettoyage ou de maintenance en espace clos. Il s'agit d'un travail appliqué très utile aux professionnels en SST qui souhaitent explorer cette avenue. Toutefois, en comparaison au présent rapport, cette étude se limite aux équipements robotisés commandés à distance et les auteurs n'ont pu aborder la facilité d'utilisation de ces technologies en conditions réelles. Dans le même ordre d'idée, Alsayed *et al.* (2021) ont récemment prototypé un drone pour inspecter et cartographier l'intérieur d'un silo de ciment. Les difficultés énoncées sont en lien avec la présence de poussière, l'absence de visuel sur le drone et l'absence de signal GPS. En outre, l'utilisation de drone semble en plein essor pour les milieux avec des conditions sévères (p. ex. Petrlík *et al.*, 2020).

Finalement, d'autres études exploitent la miniaturisation et la démocratisation des capteurs afin de développer des prototypes pour faciliter la gestion et la surveillance des entrées en espace clos. Kiehl *et al.* (2020) ont par exemple développé un système portable de capteurs de signes vitaux, de qualité de l'atmosphère et de géolocalisation pour surveiller l'entrant dans l'espace clos. Dowd et Daher (2019) ont pour leur part développé une solution qui combine la détection des gaz, la vidéo de surveillance, un système de communication bidirectionnelle, un contrôle de l'accès et un poste de commande pour supporter la gestion de l'entrée en espace clos. Enfin, Parn *et al.* (2018) ont montré qu'en combinant (1) un système de modélisation des informations du bâtiment (BIM), (2) des bases de données issues de capteurs dans le bâtiment et (3) des applications d'analyse de données, il était possible de surveiller les conditions environnementales et le comportement humain pertinents en lien avec la SST des travailleurs qui interviennent dans un espace clos associé à un bâtiment. On s'éloigne toutefois ici du concept de prévention intrinsèque pour se rapprocher de celui des EPI intelligents.

Des innovations ont également été recensées dans la documentation non évaluée par des pairs comme l'utilisation de caméra d'inspection (Levine, 2019), l'intégration de garde-corps articulé à l'ouverture de l'espace clos ou autres réalisations dans le secteur municipal (<https://www.apsam.com/theme/types-de-travail/espaces-clos/conception-des-espaces-clos>).

Ainsi, les informations sur la prévention intrinsèque et l'utilisation de moyens de protection collective dans le contexte des espaces clos restent imprécises dans le sens où peu d'informations sur leur mise en œuvre, leurs modalités d'utilisation ou leur limite technique

sont structurées. Comme le mentionnent les auteurs du guide NFPA 350, les normes et les règlements sur les espaces clos définissent ce qui doit être fait pour être conforme, mais les modalités de l'exécution et/ou la mise en œuvre restent à préciser (National Fire Protection Association [NFPA], 2019). Ce projet de recherche essaye de répondre à ce besoin d'information notamment en centralisant les connaissances disponibles à la fois dans la littérature et sur le terrain.

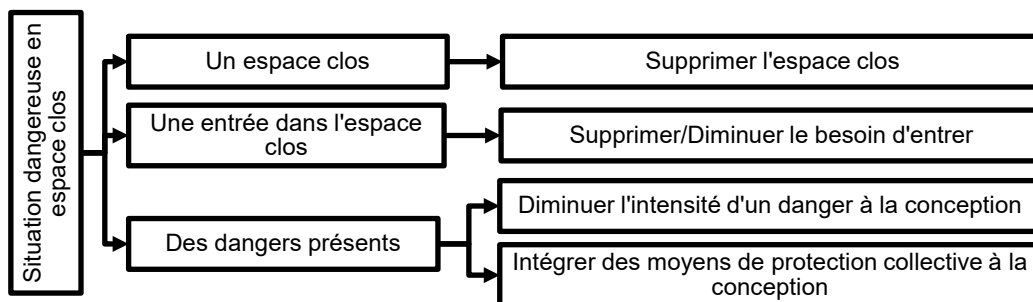
1.2 Sous-principes associés à la PIPC-EC

En se basant sur l'annexe A.3 de la norme canadienne CSA Z1006, le guide de l'AIHA (2014) et la logique associée à une situation dangereuse en espace clos présentée à la figure 3, la PIPC-EC peut être divisée de manière **préliminaire** en quatre sous-principes :

1. la suppression de l'espace clos ;
2. l'élimination/la réduction du besoin d'entrer dans l'espace clos (p. ex. : modifier l'accessibilité de certains équipements, utiliser un équipement robotisé, utiliser un outil spécifique) ;
3. la réduction de l'intensité d'un phénomène dangereux par la conception de l'espace clos (p. ex. : produits moins dangereux, réduction de pression, moyen d'accès pour le risque de chute) ;
4. l'intégration de moyens de protection collective à la conception (p. ex. : autonettoyage, ventilation intégrée, point d'ancrage permanent, mesure de gaz en continu).

Ces quatre sous-principes sont abordés succinctement dans les sections qui suivent à des fins de clarification. **Ces notions préliminaires sont approfondies et réorganisées tout au long du rapport** avec les connaissances acquises lors de l'étude avec comme finalité la création de la base de connaissances.

Figure 3. Sous-principes associés à la prévention intrinsèque et la protection collective pour les espaces clos en exploitant les éléments nécessaires à l'apparition d'une situation dangereuse.



1.2.1 Supprimer l'espace clos à la conception

Dans la définition d'un espace clos, il y a la notion qu'une personne peut entrer dans l'espace à l'occasion pour l'exécution d'un travail (RLRQ c. S -2.1, r. 13 ; ANSI et ASSE, 2016). Une manière d'éliminer un espace clos est donc d'éliminer physiquement la possibilité d'y pénétrer en concevant un espace assez petit par exemple. Cette proposition est à mettre en lien avec qu'est ce qui est considéré comme une entrée en espace clos. La raison même d'être de l'espace clos pourrait également être remise en cause en explorant des conceptions alternatives qui suppriment le confinement (p. ex. : cabinet hors-sol plutôt qu'un puits d'accès souterrain ; production *just in time* plutôt que l'utilisation de réservoir de stockage). Les guides de l'AIHA et du NFPA donnent d'autres exemples comme le fait de concevoir l'espace pour une occupation humaine en continu (Pearce et Rusczek, 2017 ; AIHA, 2014 ; NFPA, 2019). Cette notion de déclassement, qui a ses limites, est abordée dans les résultats de l'étude.

1.2.2 Réduire le besoin d'entrer

Un moyen d'éviter l'entrée dans l'espace clos est d'intégrer des technologies autonomes ou semi-autonomes lors de la phase d'exploitation (Botti *et al.*, 2016; 2017a). Les technologies utilisées pour les activités d'inspection comme la thermographie, les ultrasons, les caméras ou encore les drones sont d'autres exemples (Lecompte-Boinet, 2017; Riaz *et al.*, 2014; Leclerc, 2018; U.S. Department of Energy, 2002). Les capteurs et l'Internet des objets (IoT) sont également très efficaces pour anticiper les pannes et faire une préinspection réduisant ainsi la fréquence et le besoin d'une entrée. Cependant, il est crucial de considérer qu'ils nécessiteront à terme une intervention humaine pour leur installation et leur maintenance (Botti *et al.*, 2016; Riaz *et al.*, 2014; Wysocky, 2017a; 2017b). Pouvoir sortir l'objet de l'intervention en anticipant ce besoin lors de la conception est un autre exemple possible (p. ex. sortir la pompe du puits de pompage sans entrée dans l'espace clos).

1.2.3 Diminuer l'intensité des dangers à la conception

Lorsque l'entrée est inévitable, agir sur l'intensité des phénomènes dangereux à la conception est la prochaine option à considérer. Cela peut être fait en remplaçant un produit dangereux par un autre moins dangereux (p. ex. substitution d'un produit toxique), en réduisant l'intensité des énergies en présence (p. ex. : bruit, pression, voltage) ou encore en modifiant la configuration de l'espace (p. ex. risque de chute).

1.2.4 Moyen de protection collective à la conception

Encore une fois, si l'entrée est inévitable, l'ajout de moyens de protection à la conception tels que des points d'ancrage permanents pour les dispositifs antichute permet de mieux gérer les risques à chaque entrée pour chaque entrant (Guénette *et al.*, 2011 ; INRS *et al.*,

2010 ; Sabourin, 2018). Les recommandations relatives à la sécurité des machines telles que les protecteurs fixes, les protecteurs avec verrouillage et des dispositifs de protection s'appliquent également aux espaces clos (Safe Work Australia, 2014). Enfin, dans la littérature, ces solutions de protection sont principalement orientées vers la réduction des risques atmosphériques par ventilation naturelle ou mécanique, en fournissant des exemples de configuration (McManus et Haddad, 2016 ; Pouzou *et al.*, 2015 ; Institut national de l'environnement industriel et des risques [INERIS], 2009 ; Sabourin, 2017 ; Jiao *et al.*, 2019).

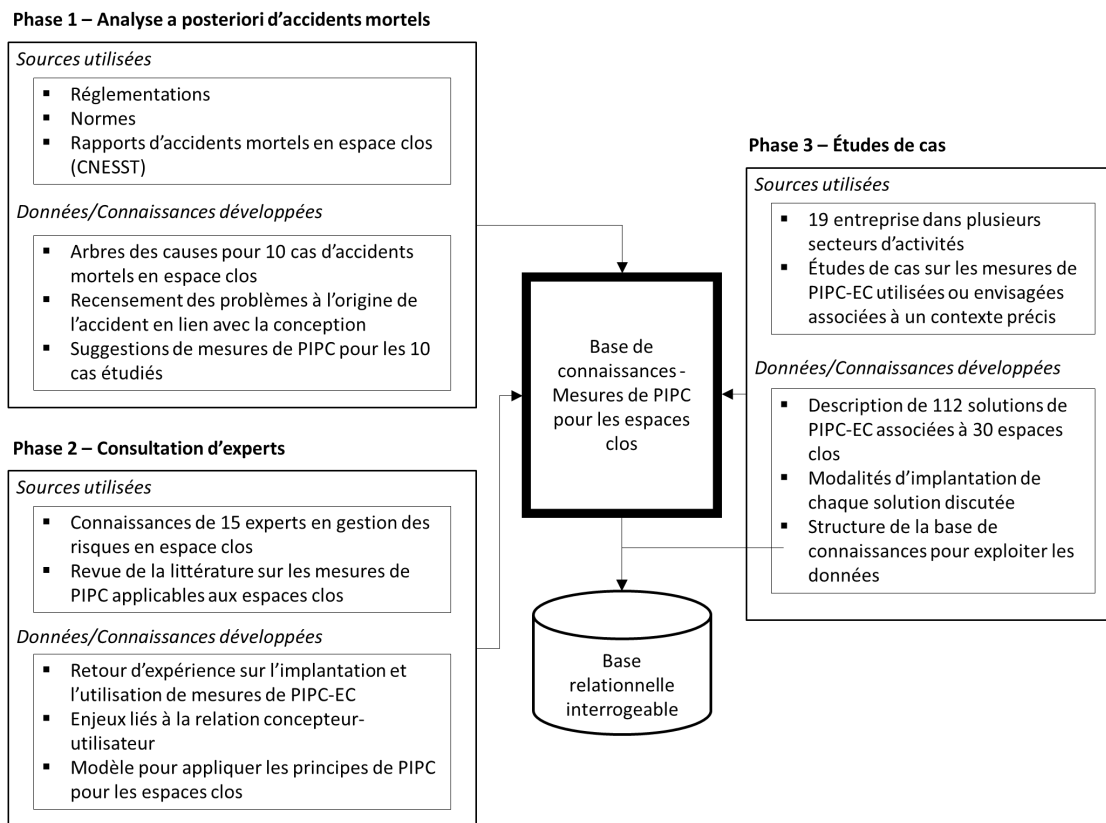
D'autres études ont également souligné l'importance du rôle de la conception pour faciliter les opérations de sauvetage. En effet, les sauveteurs improvisés représentent un pourcentage important dans les statistiques des décès en espace clos, et les travailleurs des services d'urgence font face à de nombreux défis pour extraire les victimes rapidement (Selman *et al.*, 2018 ; 2019 ; Wilson *et al.*, 2012 ; Smith *et al.*, 2018). L'exemple des points d'ancrage permanents fonctionne également pour les opérations de sauvetage. Finalement, la conception pour le sauvetage est un point important, mais elle ne doit pas se substituer à une élimination des risques à la source qui permet de supprimer les espaces clos ou les entrées (Pearce, 2016).

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 Vue d'ensemble de la méthodologie

Afin de bâtir une base de connaissances sur les moyens de prévention basés sur le principe de la PIPC pour réduire les risques lors des interventions en espaces clos, une méthodologie en trois phases a été utilisée (figure 4). Cette approche en trois phases permet une triangulation de différentes sources de données (p. ex. : accidents, littérature, entrevues, études de cas) afin d'assurer une compréhension progressive des connaissances acquises ainsi qu'une validation des données par convergence (Carter *et al.*, 2014). Elle permet en outre d'acquérir et d'exploiter des connaissances explicites (p. ex. : rapports d'accident, littérature) et tacites (p. ex. : connaissances des experts sur le terrain, études de cas). D'ailleurs, selon Nonaka (1991), une façon de capitaliser et de créer de nouvelles connaissances consiste à transformer et à mobiliser les connaissances tacites et explicites par des processus dynamiques comme l'externalisation (tacite à explicite ; p. ex. entrevues avec les experts) ou la combinaison (explicite à explicite ; p. ex. catégorisation de données pour le développement d'une base de données).

Figure 4. Vue d'ensemble des phases du projet pour la construction d'une base de connaissances sur les mesures de PIPC-EC (adaptée de González Cortés et al., 2021b).



La phase 1 du projet a permis à travers l'analyse a posteriori d'accidents mortels en espace clos de démontrer le potentiel des mesures de PIPC dans ce contexte ainsi que de fournir une première liste de mesures de PIPC associées à des situations réelles. La phase 2 avait pour objectif de consulter des experts en gestion des espaces clos ainsi que la littérature afin de développer des connaissances sur l'implantation et l'utilisation de telles mesures. Enfin, la phase 3 a consisté en 19 études de cas en entreprise afin de recenser les mesures de PIPC utilisées ou qui pourraient l'être pour des interventions réelles ciblées. Afin d'exploiter la centaine de solutions inventoriées, une base de données relationnelle a été développée en utilisant les connaissances acquises lors des précédentes phases. Les principaux éléments méthodologiques associés à chacune des trois phases sont présentés dans les sections qui suivent.

Tous les participants ont pris part à cette recherche sur une base volontaire et non rémunérée. Afin de les informer adéquatement, un formulaire d'information et de consentement a été présenté et signé avant chaque rencontre. Une approbation éthique a été obtenue du comité d'éthique de la recherche de Polytechnique Montréal (annexe A.I).

2.2 Phase 1 : Analyse a posteriori d'accidents mortels en espace clos

Dans cette section, une description sommaire de la méthodologie de la phase 1 est présentée. Cette phase 1 est détaillée dans González Cortés *et al.* (2021a).

2.2.1 Échantillon d'accidents mortels

Une analyse approfondie sur un échantillon de dix accidents mortels, enquêtés par la CNESST, a été menée avec la technique de l'arbre des causes (AdC) afin de pousser la réflexion sur ce qui aurait pu être fait au niveau de la PIPC dans ces situations. Avant de sélectionner l'échantillon d'accidents, le portrait des accidents mortels en espace clos au Québec a été mis à jour pour la période 2012-2017 selon la méthodologie utilisée dans un précédent projet de l'IRSST pour la période 1998-2011 (Chinniah *et al.*, 2016). Ainsi, les rapports d'accident mortel liés aux interventions en espace clos ont été sélectionnés à partir de la base de données publique de la CNESST en utilisant la définition d'un espace clos selon l'article 1 du RSST au moment de l'étude (<https://www.centredoc.cnesst.gouv.qc.ca/explorer-par-sujet/rapports-denquete>). Tous les rapports d'enquête ont été consultés en mai 2019. Le portrait mis à jour pour la période 1998-2017 comprend au total 44 rapports d'accidents pour 53 décès. La figure 2 présente cet échantillon par type de risque.

Concernant la sélection de 10 rapports parmi les 44 recensés pour l'analyse avec la technique de l'AdC, la constitution de cet échantillon devait d'abord refléter la distribution des décès par type d'accidents. Ensuite, les rapports d'accidents mortels avec le plus de détails et ceux où plus d'un travailleur était impliqué ont été privilégiés. Enfin, l'échantillonnage devait éviter les cas redondants (p. ex. même type d'espace clos). L'échantillon obtenu est présenté au tableau 1. Au final, six types d'espaces clos ont été étudiés, chacun étant représentatif d'un secteur d'activité : 1) réservoirs/cuves (fabrication, chimie) ; 2) stations de pompage des eaux usées (municipal) ; 3) puits d'accès (énergie/télécom) ; 4) camions-citernes (transport) ; 5) triturateurs (pâtes et papiers) ; 6) chaudières/systèmes de traitement de l'air (services/construction). Les principaux types de dangers affectant les espaces clos sont également représentés : atmosphérique (cas A, B et C), mécanique (cas D et E) et physique (cas F à J). Finalement, différents types d'intervention ont été inclus dans l'échantillon avec notamment des activités de dépannage non planifiées (cas A, E, F, H, I et J) ou des activités de maintenance prévues (B, C, D et G).

Tableau 1. Échantillon de dix accidents mortels sélectionnés

Cas	Réf.	Type	Année	Secteur	Espace clos	Intervention	Décès	Cause
A	EN-003536	Intoxication	2004	Services commerciaux	Station de pompage	Déblocage	3	Gaz (H ₂ S)
B	EN-003643	Asphyxie	2006	Chimique	Cuve	Modification (polissage)	3	Gaz (Ar)
C	EN-004119	Explosion	2016	Services commerciaux	Camion-citerne	Réparation (soudure)	1	Carburant
D	EN-003202	Coincé par	1999	Production énergie	Turbine	Maintenance	2	Pales de la turbine
E	EN-003895	Coincé par	2011	Agricole	Mélangeur	Retrait du surplus	1	Pales du mélangeur
F	EN-003317	Chute d'objet	2001	Mines, carrières et puits de pétrole	Trou de forage	Récupération d'objet	1	Chute d'une pièce
G	EN-003337	Chute de hauteur	2002	Pâtes et papiers	Séchoir	Nettoyage haute pression	1	Présence de vide
H	EN-003705	Électrocution	2007	Services commerciaux	Plénum (ventilation)	Dépannage (ventilateur)	1	Éléments sous tension
I	EN-003935	Ensevelissement	2012	Agricole	Silo	Retrait de galettes moisies	1	Grains de maïs
J	EN-004047	Noyade	2014	Agricole	Trou d'homme	Réparation canalisation	1	Trou + eau

2.2.2 Technique de l'arbre des causes (AdC)

Dans un AdC, les faits qui ont contribué à l'accident sont représentés et organisés dans un schéma sous la forme d'une arborescence. L'objectif est de remonter de l'effet aux causes les plus en amont possible (Leplat, 1978 ; Monteau et Favaro, 1988 ; Katsakiori *et al.*, 2009). L'application de la méthode de l'AdC repose sur une compréhension objective du processus de l'accident et la mise en évidence de faits. Un cadre d'observation simplifié du type MÉLITO (c.-à-d. moment, équipement/outil, lieu, individu, tâche, organisation du travail) peut être utilisé pour réaliser cette étape (Plante et Poulin, 1998). Les causes hypothétiques ne sont pas abordées contrairement à un arbre des fautes par exemple (Harms-Ringdahl, 2001). Dans le cadre de ce projet, la mise en évidence des faits avait été effectuée par les inspecteurs de la CNESST et rendue publique par le rapport d'enquête détaillé. Les AdC, s'ils ont été créés n'ont pas été rendus publics.

Un arbre des causes est construit de droite à gauche afin que le sens de lecture (de gauche à droite) corresponde à l'enchaînement logique des faits. Le point de départ, à droite, est l'accident. À chaque étape, on détermine la ou les causes critiques (primaires) en se posant les questions : « Qu'a-t-il fallu pour qu'advienne l'accident ? » et « A-t-il fallu autre chose ? » (Andéol-Aussage *et al.*, 2013). Le niveau de profondeur de l'arbre (c.-à-d. quand est-ce qu'on s'arrête ?) sera déterminé par les données disponibles. Un AdC permet de distinguer graphiquement les « événements inhabituels » (écarts ; représentés dans un rond) et les « événements habituels » (conditions typiques ; représentés dans un rectangle) (Harms-Ringdahl, 2001 ; Andéol-Aussage *et al.*, 2013). Alors que les « écarts » sont plus susceptibles d'être identifiés par les enquêteurs, des

défauts de conception peuvent exister pendant une période prolongée sans qu'aucun incident ne se produise (Moura *et al.*, 2016).

L'élaboration des différents AdC a commencé par une première analyse du rapport d'enquête et un résumé des faits saillants par un membre de l'équipe de recherche. Par la suite, une première version de l'AdC a été construite accompagnée de l'identification des causes liées à la conception et de suggestions de mesures de PIPC pour y remédier. Ce travail préliminaire a été ensuite validé et enrichi par deux autres membres de l'équipe de recherche de manière itérative. Enfin, un consultant externe a effectué une dernière validation afin d'obtenir un avis indépendant.

2.3 Phase 2 : Consultation d'experts

Dans cette section, une description sommaire de la méthodologie de la phase 2 est présentée. Cette phase 2 est détaillée dans González Cortés *et al.* (2021b).

En complément de la revue de la littérature (chapitre 1), une quinzaine d'experts sur la gestion des risques en espace clos ont été consultés. L'objectif était de recueillir leurs connaissances et leurs expériences sur les moyens de prévention basés sur le principe PIPC-EC, les enjeux d'implantation ou encore la relation utilisateur-concepteur. Le tableau 2 détaille l'échantillon d'experts recrutés. Le nombre de 15 experts a été basé sur le principe de saturation (Gillham, 2000) qui consiste à arrêter la collecte de données lorsque les informations transmises deviennent répétitives. D'après nos projets antérieurs, le nombre de 15 était un bon compromis entre l'aspect prospectif et la volonté de documenter des situations de travail diversifiées.

Le groupe de participants a été constitué à l'aide de l'échantillonnage par jugement (c.-à-d. l'enquêteur choisit l'échantillon et non le hasard). Cette technique est largement utilisée dans les études de nature qualitative pour l'identification et la sélection d'unités lorsque les ressources sont limitées. Dans ce cas, le chercheur constitue l'échantillon qui va lui permettre d'atteindre les objectifs fixés (Statistique Canada, 2013). Cela implique d'identifier et de sélectionner des individus ou des groupes d'individus qui ont une base de connaissances riche sur un phénomène d'intérêt et qui ont la volonté de participer (Palinkas *et al.*, 2015). Dans ce cas-ci, les critères minimaux à respecter ont été : 1) avoir une expérience professionnelle d'au moins trois ans en gestion des espaces clos ; 2) avoir participé dans la dernière année à l'identification et à la réduction des risques pour une dizaine d'interventions en espaces clos. Au final, l'échantillon comprend trois consultants (inspection, mesure de gaz, analyse et réduction du risque), deux conseillers en SST ou en sauvetage, cinq chefs d'exploitation (traitement des eaux, agroalimentaire), deux formateurs en gestion du risque en espace clos et trois travailleurs expérimentés qu'ils soient entrepreneurs ou à l'interne. Une moyenne de 19 ans d'expérience en espace clos a été comptabilisée. L'échantillon choisi permet d'obtenir plusieurs points de vue variés sur le sujet à savoir celui des entrants, des gestionnaires, de spécialistes de certains

moyens de réduction du risque (p. ex. consultants), de généralistes en gestion du risque en espace clos (p. ex. formateurs) ou encore de propriétaires-concepteurs (p. ex. chef d'exploitation). À défaut d'avoir des fabricants-concepteurs d'espaces clos dans l'échantillon (recrutement difficile), cinq propriétaires-concepteurs (c.-à-d. responsable du cahier des charges côté client) ont été inclus. Inclure ces derniers dans l'échantillon était primordial pour recueillir des données de première main sur les relations clients-concepteurs et les contraintes de conception.

Tableau 2. Échantillon de 15 experts en gestion des espaces clos recrutés

Réf.	Service/Secteur	Fonction	Responsabilité en lien avec la gestion des espaces clos	Expérience gestion espace clos (ans)	N ^{bre} interventions (implication dernière année)
1	Services d'inspection	Consultant	Sous-traitant (entrant)	30	10-50
2	Conseils techniques	Sauveteur	Élaboration de plans de gestion du risque	20	>400
3	Eaux potables et usées	Chef d'exploitation	Responsable des opérations/Gestion SST	25	10-50
4	Fabrication de machines	Formateur	Élaboration de plan de gestion du risque	14	10-50
5	Conseils techniques	Formateur	Élaboration de plan de gestion du risque	32	100-200
6	Transformation des métaux	Travailleur expérimenté	Représentant des travailleurs/Contremaître	14	100-200
7	Production électrique	Conseiller en SST	Gestion de la SST	11	10-50
8	Eaux potables et usées	Chef d'exploitation	Responsable des opérations/Gestion SST	21	10-50
9	Conseils techniques	Consultant	Élaboration de plans de gestion du risque	20	350-400
10	Eaux potables et usées	Chef d'exploitation	Responsable des opérations/Gestion SST	20	10-50
11	Eaux potables et usées	Chef d'exploitation	Responsable des opérations/Gestion SST	31	10-50
12	Instrumentation (mesure de gaz)	Consultant	Sous-traitant (entrant)	26	10-50
13	Secteur pétrolier	Travailleur expérimenté	Représentant des travailleurs/Contremaître	15	50-100
14	Agroalimentaire	Chef d'exploitation	Gestion de la SST en espace clos	3	10-50
15	Agroalimentaire	Travailleur expérimenté	Champion en espaces clos	6	150-200

La collecte de données a été initiée par une préenquête au téléphone afin de vérifier si les experts répondaient aux critères de sélection prédéfinis. Par la suite, une rencontre avec chaque expert était organisée sous la forme d'une entrevue semi-dirigée individuelle, la plupart du temps sur son lieu de travail. La durée de la rencontre était de deux heures maximum, et deux membres de l'équipe de recherche étaient présents pour assurer (1) le questionnement sur l'ensemble des sujets souhaités, et (2) une redondance lors de la prise d'information. Cette façon de faire permet d'assurer un niveau de qualité adéquat en minimisant la perte d'information.

Le questionnaire utilisé est disponible en annexe B.I (tableau 23). La première partie du questionnaire visait à faire le point sur les expériences de la personne consultée. La deuxième partie avait pour objectif de recueillir les stratégies de réduction des risques traditionnellement mises en œuvre lors des interventions et les enjeux liés. Enfin, la troisième partie, la plus importante, permettait d'aborder les principes de PIPC-EC que ce soit des exemples pratiques, les facteurs favorisant et limitant ces principes, la relation avec les concepteurs ou encore des solutions innovantes vues ou envisagées. Les enregistrements de chaque entrevue ont été retranscrits et un compte-rendu complet a été rédigé et validé par les membres de l'équipe présents lors de la rencontre. Les données ont ensuite été catégorisées pour analyse à l'aide de Microsoft Excel© (Microsoft Corporation, 2016). Un codage ouvert a été utilisé à cette étape. Le codage ouvert a pour but d'exprimer des données sous forme de concepts (Böhm, 2004).

2.4 Phase 3 : Études de cas et base de connaissances

2.4.1 Échantillon pour les études de cas

L'objectif initial pour les études de cas en entreprise était de cibler six contextes de travail typiques (c.-à-d., type d'espace clos et secteur d'activité) et de sélectionner trois cas pour chaque contexte à des fins de comparaison. L'échantillon devait donc inclure 18 études de cas. Les six contextes de travail visés initialement, en se basant en partie sur l'analyse des accidents mortels, étaient : 1) station de pompage des eaux usées (municipal) ; 2) puits d'accès électrique (énergie/télécom) ; 3) réservoir à pâte, triturateur (pâtes et papier) ; 4) réservoir/cuve (fabrication, chimie) ; 5) citerne de camion (transport) ; 6) chaudière/traitement de l'air (maintenance industrielle/construction). Tout comme pour les experts (section 2.3), les principes de saturation (Gillham, 2000) et d'échantillonnage par jugement ont été utilisés (Statistique Canada, 2013 ; Palinkas *et al.*, 2015). L'échantillon devait également inclure de petites entreprises (moins de 50 employés) afin de pouvoir tenir compte de leur réalité.

Le tableau 3 présente l'échantillon des 19 entreprises/organismes finalement recrutées (codés de A à S). L'ensemble des entreprises rencontrées avait un comité de SST, un programme de gestion des espaces clos, des employés formés (dont 9/19 uniquement en interne) conformément aux critères de recrutement. Par ailleurs, 17/19 entreprises avaient des procédures de sauvetage éprouvées (dont 6/19 avec une brigade en interne) et 14/19 effectuaient des audits. Au final, l'échantillon est proche de celui visé au départ avec trois entreprises dans le traitement des eaux (cas n° G, I, K), trois dans la distribution électrique/télécom (cas n° A, C, H), trois dans le secteur des pâtes et papiers (cas n° F, N, R), quatre dans la fabrication de pièces et le traitement chimique (cas n° B, D, E, L), trois en lien avec le transport (cas n° O, P, S) et trois dans la maintenance industrielle et le génie civil (cas n° J, M, Q). L'échantillon est assez varié en termes de profil d'entreprise avec a) 7/19 entreprises du secteur public ou parapublic et 12/19 du secteur privé, b) 7/19 entreprises de plus de 500 employés et 3/19 avec moins de 50 et c) une

proportion très variable d'employés concernés par les interventions en espace clos (7/19 entreprises avec moins de 25 % et 5/19 avec plus de 75 %). Il en est de même avec le nombre d'espaces clos et le nombre d'entrées. L'échantillon comprend 5/19 entreprises avec plus de 500 espaces clos et 6/19 avec moins de 50 espaces clos ou en sous-traitance. 15/19 entreprises sont propriétaires de leurs espaces clos et 4/19 sont des sous-traitants.

Pour 6 des 19 entreprises rencontrées (32 %), les participants rencontrés jouaient un rôle de concepteur côté client. Comme mentionné pour les experts, il était primordial d'avoir l'avis de concepteurs dans le contexte de l'étude afin d'obtenir des données non seulement en réingénierie, mais aussi lors de la construction de nouveaux ouvrages. D'ailleurs, une dernière entreprise (peinture) avec des intervenants qui jouent le rôle de concepteur côté client a été rencontrée en complément en fin de projet afin de confronter la base de connaissances à leur réalité. Des concepteurs-fabricants n'ont pas été rencontrés dans le cadre de l'étude. Leur point de vue a seulement été abordé par le prisme des clients. Il s'agit d'une limite de l'étude évoquée à la section 5.3.3.

Le tableau 4 fournit plus de détails sur les 30 types d'espaces clos ciblés en collaboration avec les participants (p. ex. : intervention la plus fréquente, à risque, où il y a eu des innovations) (codés de 1 à 30).

Tableau 3. Description de l'échantillon de 19 études de cas

n° cas	Activité en lien avec les espaces clos	Secteur	N ^{bre} employé	N ^{bre} espace clos	N ^{bre} entrée/an	Profil par rapport aux espaces clos	Espaces clos ciblés
A	Distribution électrique et télécom	Municipal	100-499	>500	>500	Propriétaire ; Concepteur	Puits d'accès électrique
B	Traitement de déchets	Chimique	100-499	100-499	50-99	Propriétaire	Réservoir ; Silo ; Bassin ; Wagon ; Camion roll-off
C	Distribution électrique	Énergie	>500	>500	>500	Propriétaire ; Concepteur	Puits d'accès électrique
D	Fabrication de véhicule motorisé	Manufacturière	>500	100-499	50-99	Propriétaire	Réservoir de filtration ; Bassin décantation ; Bassin dégraissage ; Presse hydraulique
E	Fabrication de pièces (moulage)	Manufacturière	100-499	100-499	50-99	Propriétaire	Bassin produits chimiques ; Cuve produit procédé ; Silo
F	Production de papier	Pâtes et papiers	>500	>500	100-499	Propriétaire	Réservoir de liqueur noire ; Précipiteur électrostatique
G	Traitement des eaux usées	Municipal	0-49	1-49	0-49	Propriétaire ; Concepteur	Dessableur ; Digesteur
H	Distribution électrique	Municipal	100-499	50-99	0-49	Propriétaire ; Concepteur	Puits d'accès électrique
I	Distribution de l'eau potable	Municipal	100-499	>500	100-499	Propriétaire ; Concepteur	Chambre de régulation de pression ; Regard d'égout
J	Maintenance industrielle	Chaudronnerie, tuyauterie	100-499	Aux clients	50-99	Sous-traitant (maintenance)	Chaudière à vapeur à tubes d'eau
K	Collecte des eaux usées	Municipal	0-49	100-499	100-499	Propriétaire ; Concepteur	Poste de pompage
L	Fabrication de pièces (usinage)	Manufacturière	100-499	1-49	0-49	Propriétaire	Bassin d'acide ; Convoyeur de fosse
M	Construction en génie civil	Construction	>500	Aux clients	100-499	Sous-traitant (constructeur)	Réservoir pétrolier ; Silo ; Infrastructure génie civil
N	Production de papier	Pâtes et papiers	>500	100-499	100-499	Propriétaire	Réservoir de pâte
O	Entretien du matériel roulant	Municipal	0-49	1-49	0-49	Propriétaire	Camion-citerne
P	Distribution de béton	Construction	>500	100-499	>500	Propriétaire	Boule de bétonnière
Q	Maintenance industrielle	Pétrolier	>500	100-499	100-499	Sous-traitant (maintenance)	Fournaise ; Cheminée ; Colonne de séparation
R	Production de papier	Pâtes et papiers	100-499	>500	100-499	Propriétaire	Cuvier ; Trémie ; Bassin de décantation
S	Réparation de wagon-citerne	Transport	100-499	Aux clients	0-49	Sous-traitant	Wagon-citerne

Tableau 4. Description des espaces clos et des interventions ciblées dans les 19 études de cas

EC_ID	n° Cas	Espace clos	Type	Informations sur l'espace clos
Distribution électrique et télécom				
1	A ; C ; H	Puits d'accès électrique	Trou d'homme/Chambre	Accès aux câbles enfouis (électrique, télécom). Milliers d'espaces clos identiques. 3 m de profond, 2.5 x 4 m. Entrée par le haut. Circulaire, 1.04 m de diamètre
Collecte et traitement des eaux				
2	D ; R	Bassin de décantation	Bassin ouvert	Traitement eaux usées. Décantation des boues. 1 espace clos identique. Bassin ouvert de grandes dimensions. Entrée par le haut
3	D	Réservoir filtration	Réservoir	Traitement eaux usées. Processus de filtration. 3 espaces clos identiques
4	G	Dessableur	Bassin ouvert	Traitement eaux usées. Décantation et séparation des graisses. 2 espaces clos identiques. 4,5 m de profond, 4 x 20 m de long. Entrée par le haut
5	G	Digesteur	Réservoir	Traitement eaux usées. Valorisation des boues, biogaz. 2 espaces clos identiques. 12 m de haut, 12 m de diamètre. Entrée par le bas, en sous-sol
6	I	Chambre de régulation de pression	Trou d'homme/Chambre	Réseau de distribution eau potable. Une centaine d'espaces clos identiques. 2 m de profond, variable. Accès par le haut
7	I	Regard d'égout	Trou d'homme	Réseau égout. Accès à la canalisation. Plusieurs centaines d'espaces clos. 1,8 m de profond, 1,2 m de diamètre mini. Entrée par le haut, 0,76 m de diamètre
8	K	Poste de pompage	Trou d'homme	Réseau égout. Relèvement avec pompes submersibles au fond + Palier intermédiaire pour accès équipements. Centaine d'espaces clos similaires. 10 m de profond depuis le palier, variable. Entrée par le haut, trappe rectangulaire
Entretien équipement mobile				
9	B	Wagon gondole	Bassin ouvert mobile	Conteneur pour transport ferroviaire ouvert. Équipement standard. 2 m de profond, 3 x 13 m de long. Entrée par le haut
10	B	Camion conteneur roll-off	Bassin ouvert mobile	Conteneur pour transport routier ouvert. Équipements standards. 2 m de profond, 3 x 6 m de long. Entrée par le haut.
11	O	Camion-citerne	Réservoir mobile	Citerne en acier sur camion. Cloisonnée partiellement. Équipements standards. Section carrée de 2 m. Ouverture sur le dessus, 0,30 m de côté.
12	P	Boule de bétonnière	Réservoir mobile	Boule avec à l'intérieur une palette en T en spirale qui permet de brasser le béton et de le faire remonter. Équipements standards. 8 m ³ , 4 m de long, 2 m de diamètre. Entrée sur le côté boulonnée, 0,41 x 0,48 m.
13	S	Wagon-citerne	Réservoir mobile	Citerne pour le transport ferroviaire de pétrole, chlore, produits liquides. Cloisonnée partiellement. Équipements certifiés (DOT 111). 3 m de diamètre, 15 m de long. Accès sur le dessus, diamètre d'environ 0,46 m
Production de papier et carton				
14	F	Réservoir de liqueur noire	Réservoir	Produit récupéré lors de la création de la pâte. Sert comme combustible. 1 espace clos identique. 9 m de diamètre, 15 m de haut. Ouvertures sur le dessus, en bas (0,60 x 0,60 m).
15	N ; R	Cuvier à pâte	Réservoir	Stockage de la pâte (15 à 24 h). En céramique. Plusieurs centaines d'espaces clos identiques. Volume en tonnes de pâtes. 1-2 ouvertures sur le dessus et en bas.
Maintenance équipement industriel lourd				
16	D	Presse hydraulique	Trou d'homme/Chambre	Accès sous la presse pour le système hydraulique. Quelques espaces clos identiques. Trou d'homme de 2 m de profond. Accès par le haut.
17	F	Précipitateur électrostatique	Intérieur équipement	Captage de la poussière de combustion de la chaudière. 2 espaces clos identiques. Plusieurs étages de haut.

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

EC_ID	n° Cas	Espace clos	Type	Informations sur l'espace clos
18	J	Chaudière à vapeur à tubes d'eau	Intérieur équipement	Chambre chauffée qui contient de 3000-6000 tubes dans lesquels circulent de l'eau. 1 espace clos identique. Plusieurs étages de haut, espace intérieur restreint. Plusieurs ouvertures sur les côtés.
19	Q	Fournaise industrielle	Intérieur équipement	Chambre de combustion. 1 espace clos identique. Plusieurs étages de haut.
20	Q	Cheminée	Cheminée	Cheminée de fournaise industrielle sur une raffinerie. 1 espace clos identique. 60 m de haut, diamètre de plusieurs mètres. Entrée par le haut.
21	Q	Colonne de séparation	Cheminée	Colonne de séparation sur une raffinerie. Quelques espaces clos identiques. 60 m de haut, 1,5 m de diamètre. Entrée prévue par le côté de 0,46 m de diamètre.
22	M	Réservoir pétrolier	Réservoir	Stockage pétrole sur une raffinerie. Plusieurs dizaines d'espaces clos identiques. Hors sol. Très grand volume (millions de litres). Entrée sur le côté.
Traitement chimique				
23	B	Réservoir produit liquide	Réservoir	Stockage de liquide alcalin. 4 espaces clos identiques. 5 m de haut et 12 m de diamètre. Entrée par le côté, diamètre de 1,2 m et sur le dessus.
24	E	Cuve produit procédé	Bassin ouvert	Stockage de cire. 2 espaces clos identiques. 5 m de haut et 3 m de diamètre. Entrée par le dessus.
25	B ; D ; E ; L	Bassin produits chimiques	Bassin ouvert	Traitement de pièces (p. ex. dégraissage). Produits chimiques (p. ex. : HF, HNa). Dizaine d'espaces clos identiques côte à côte. 2 à 3,5 m de profond. Accès difficile. Entrée par le dessus.
Stockage, distribution produits solides				
26	B ; M	Silo, dépoussiéreur	Silo	Stockage de matière solide (p. ex. : poussière, chaux). Fermé. 1 espace clos identique. 9 m de haut, 3 m de côté (section carrée). Entrée sur le côté en hauteur.
27	R	Trémie	Silo ouvert	Stockage matière solide (p. ex. copeaux), ouvert. Plusieurs espaces clos identiques. Exemple : 5 m de haut, 3 m de côté (section carrée). Entrée par le haut ou le côté.
28	E	Silo de sable	Silo	Alimentation du procédé en circuit fermé. 1 espace clos identique. Exemple : 7 m de haut, 2 m de diamètre. Entrée par le haut.
29	L	Convoyeur de fosse	Intérieur équipement	Récupère et achemine les copeaux issus de l'usinage. 2 espaces clos identiques. 2,5 m sous le niveau du sol, sous des caillebotis. Entrée par le haut.
Génie civil				
30	M	Infrastructure génie civil	Chambre	Espaces clos dans l'infrastructure d'un ouvrage (p. ex. pont). Type d'espace clos très variable. Ouverture pour l'entrée pas toujours planifiée.

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

2.4.2 Collecte de données et analyse

Effectuées en contexte de pandémie (COVID-19), les études de cas ont eu lieu par visioconférence plutôt que sur site comme prévu initialement. Cet ajustement nécessaire a eu finalement relativement peu d'impact sur la qualité de la collecte de données. Cela s'explique premièrement par la nature des discussions (c.-à-d. orientée sur un problème concret) et par le profil des personnes rencontrées (c.-à-d. gestionnaire, coordonnateur) (Denstadli *et al.*, 2012). Aussi, la facilité du partage de photos ou de documents à l'écran par les participants afin d'illustrer leurs propos ainsi que certains avantages logistiques (p. ex. : présence de plusieurs participants qui ne sont pas sur le même lieu de travail, horaire et durée des rencontres plus flexibles) ont contrebalancé des échanges parfois moins spontanés. Lors du recrutement, il était visé de rencontrer le responsable SST du dossier espace clos et une personne avec un profil opérationnel ou pertinent afin d'avoir des visions complémentaires sur les espaces clos ciblés (p. ex. : conception, opération et SST). Cela s'est traduit dans l'échantillon de personnes rencontrées avec 15 profils SST (p. ex. : coordonnateur, brigade), 15 profils opérationnels (p. ex. : entrant, gestionnaire, planificateur) et 5 profils en conception/projet (p. ex. : gestionnaire, ingénieur).

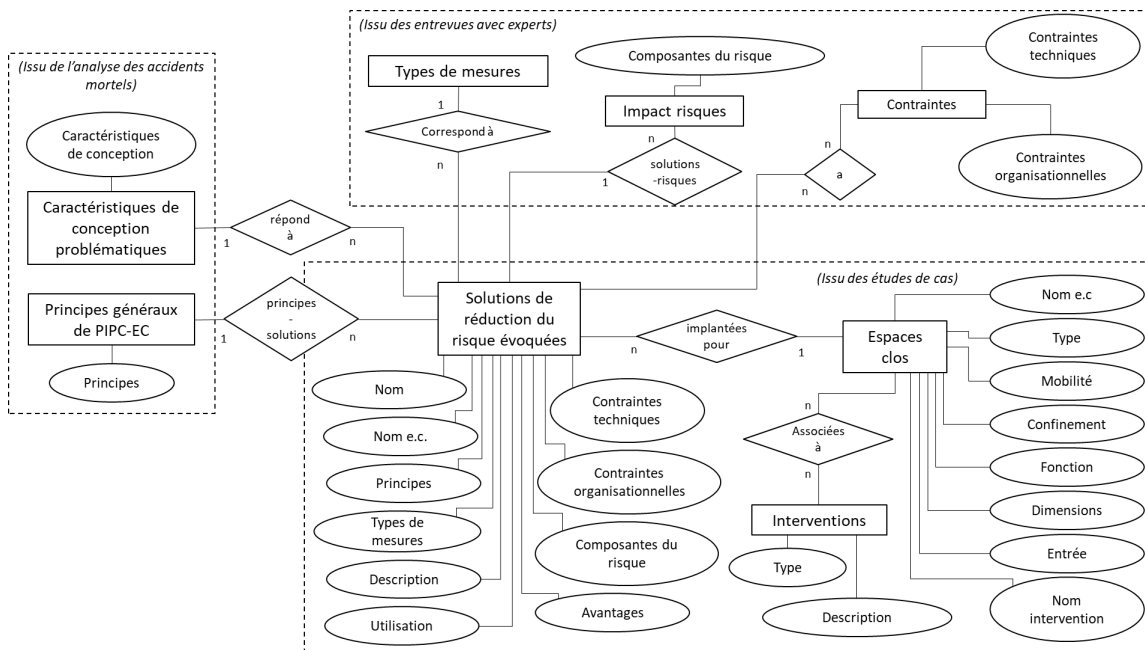
Les entrevues semi-dirigées se sont déroulées en trois temps selon les principes de la recherche qualitative déjà détaillée précédemment (Brikci et Green, 2007 ; Patton, 2002) : 1) recueillir des informations générales sur l'entreprise et sa gestion des risques pour les interventions en espace clos (environ 20 min) ; 2) déterminer et documenter les situations de travail en espace clos ciblées (40 min) ; 3) discussions autour des mesures PIPC mises en place, envisagées ou rejetées pour les situations ciblées (90 min). Cette dernière partie était alimentée lorsque nécessaire par l'équipe de recherche en se basant sur les connaissances acquises lors des phases précédentes du projet. Chaque solution a été discutée en termes d'applicabilité dans le but d'identifier les facteurs favorisant et limitants. Lorsque les contraintes de confidentialité le permettaient, l'entreprise a partagé de la documentation (p. ex. : photos, permis d'entrée). La collecte de données pouvait avoir lieu en une ou deux rencontres selon les circonstances.

Pour chaque étude de cas, les enregistrements des entrevues ont été retranscrits et un compte-rendu complet, incluant la documentation transmise, a été rédigé et validé par les membres de l'équipe présents lors de la rencontre. Des échanges de courriels ou une autre rencontre ont été effectués à cette étape pour les questions en suspens. Par la suite, une synthèse axée sur les mesures de PIPC a été effectuée dans chacun des cas. Ces synthèses étaient une première étape vers la construction de la base de connaissances relationnelle sur Microsoft Excel© (Microsoft Corporation, 2016).

2.4.3 Construction de la base de connaissances

Afin de concevoir une base de connaissances exploitable, toutes les données recueillies ont été structurées dans un diagramme « entité-association » (EA) (figure 5). Le diagramme EA est une représentation graphique utilisée pour organiser l'information de manière logique lors de la conception de systèmes informatiques. Le diagramme EA comprend des entités (c.-à-d. objets réels ou concepts) représentées par des carrés, les attributs de ces entités (c.-à-d. description des entités) représentés par des ovales ainsi que les interrelations entre les entités (représentées par des losanges) (Chen, 1976).

Figure 5. Diagramme « Entité-association » associé à la base de connaissances pour les mesures de PIPC-EC.



Les entités et les attributs de la figure 5 ont été définis en se basant sur les données des études de cas, sur l'analyse des accidents mortels et les entretiens avec les experts. L'entité « solutions de réduction du risque évoquées » est le centre du diagramme et fait le lien avec l'ensemble des entités (c.-à-d. une solution est reliée à un espace clos, une intervention, etc.).

Une fois les entités et les attributs identifiés, l'étape suivante a consisté à établir les relations entre elles. Un élément de connaissance d'une entité peut être lié à un seul ou plusieurs éléments de connaissance d'une seconde entité (1 : n), ou une pluralité d'éléments de connaissance peut être liée à un autre élément de connaissance (n : n). Un exemple de relation un à plusieurs (1 : n) est qu'une solution de réduction du risque peut agir sur plusieurs types de risque.

Une fois le modèle finalisé, le diagramme EA a été converti en une base de données avec *PowerPivot*, un outil d'analyse et de modélisation de données disponible pour Microsoft Excel© (Microsoft Corporation, 2016). Pour cela, chaque entité a été convertie en une table de données où les colonnes représentent les attributs de l'entité. Les tables obtenues sont disponibles au chapitre 5. La taxonomie⁵ des champs de données a été améliorée par un processus itératif en prenant en compte l'émergence de nouvelles catégories au fur et à mesure de l'analyse. Une évaluation formelle de la qualité des données a été adoptée pour normaliser les termes, pour éviter la redondance et pour assurer l'exhaustivité et la cohérence des données (Strong *et al.*, 1997). Aussi, le modèle relationnel a été vérifié pour s'assurer que toutes les relations étaient cohérentes. Finalement, une interface utilisateur a été créée afin de tester le principe d'interrogation de la base de données. Ce travail a été fait en utilisant un tableau croisé dynamique dans Microsoft Excel© (Microsoft Corporation, 2016).

⁵ Nomenclature, classification des données sur un thème (p. ex. les différents types d'intervention).

3. RÉSULTATS – ANALYSE A POSTERIORI D'ACCIDENTS MORTELS

Afin d'illustrer le travail effectué avec les rapports d'enquête d'accidents sélectionnés (cf. section 2.2.1), un AdC (cas A) est détaillé dans ce chapitre à titre d'exemple. Les neuf autres accidents sélectionnés ont été analysés de la même manière. Les AdC sont présentés à l'annexe C.I et l'ensemble des mesures de PIPC proposées à travers l'analyse des dix AdC sont présentées du tableau 5 au tableau 7. Il s'agit de suggestions théoriques pour prouver le potentiel des mesures de PIPC-EC. Ces suggestions ne prennent pas en compte les contraintes réelles (p. ex. financières). Cette dimension a plutôt été abordée dans la suite du projet. L'ensemble des données sont disponibles dans González Cortés *et al.* (2021a).

3.1 Cas A – Intoxications

3.1.1 Séquence des événements

Le 27 août 2004, un employé du camping (A) débloque le tuyau d'écoulement entre la fosse septique et la station de pompage (figure 6). (A) est rapidement intoxiqué par du sulfure d'hydrogène (H₂S) et s'affaisse dans l'échelle (décès). Le propriétaire (B) qui est avec lui tente de le secourir. Il est lui aussi intoxiqué et il chute dans la station (décès). Alertés par les cris, plusieurs campeurs arrivent sur les lieux et tentent des sauvetages improvisés. Un campeur (C) décède, intoxiqué, tandis que deux autres sont gravement intoxiqués ou blessés (D et E).

Figure 6. Entrée de la station de pompage (CNESST, 2005, EN-003536).

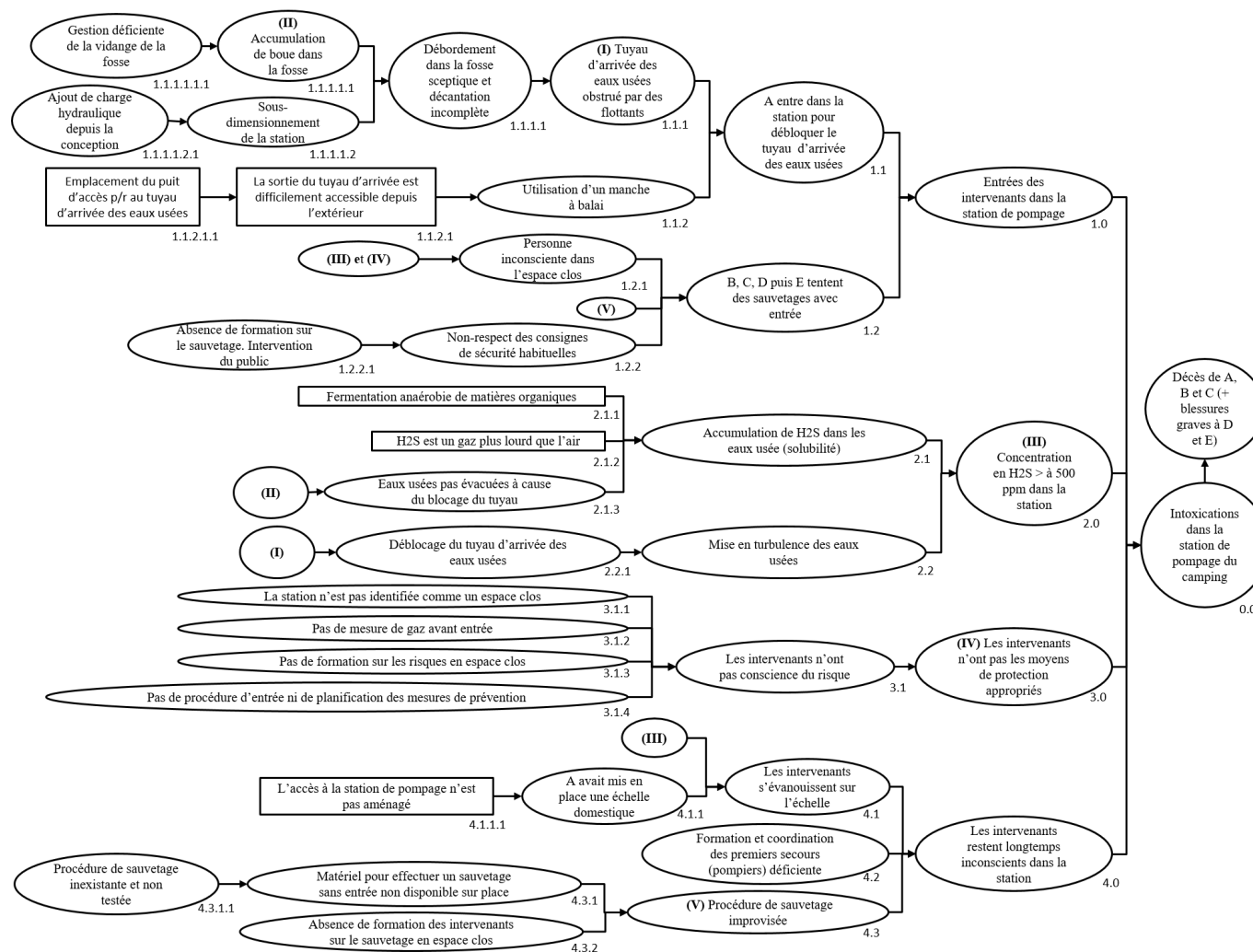


L'AdC est présenté à la figure 7. La branche 1.0 détaille pourquoi les victimes sont entrées dans l'espace clos. Par exemple, (A) est entré pour débloquer le tuyau d'arrivée des eaux usées dans la station de pompage. Le blocage s'explique notamment par un sous-dimensionnement de la station par rapport à la charge qui a augmenté au fil des années et une vidange déficiente de la fosse. De plus, le point de blocage n'était pas accessible de l'extérieur.

La branche 2.0 explique l'origine du phénomène dangereux (c.-à-d. concentration mortelle de H₂S). Le déblocage du tuyau a notamment mis en turbulence les eaux usées libérant le H₂S accumulé. Les branches 3.0 et 4.0 expliquent les autres causes nécessaires à la survenue de décès à savoir l'absence de mesures de réduction du risque et de moyens de sauvetage.

En analysant les dix AdC, on remarque que la même structure se répète à savoir quatre branches qui expliquent respectivement la présence de la victime dans la zone dangereuse, l'origine du phénomène dangereux, les raisons pour lesquelles la victime n'a pas pu éviter l'accident et enfin pourquoi l'entrant n'a pu se sortir de la situation dangereuse.

Figure 7. AdC développé pour le cas A (Intoxications, station de pompage).



IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

3.1.2 Supprimer/Réduire le besoin d'entrer

De manière théorique, une première manière d'agir à la conception serait de travailler sur le besoin d'entrer. Par exemple, il est possible de placer une station de pompage hors sol par-dessus la fosse (p. ex. Smith & Loveless Inc., 2016). Contrairement à une configuration avec des pompes submersibles, cette configuration permet aux opérateurs d'accéder facilement aux pièces mécaniques de la pompe en ouvrant une enceinte hors sol sans confinement. Il est également possible d'intégrer des turbines pouvant laisser passer des solides de 76 mm pour limiter le colmatage.

Une deuxième approche qui cette fois ne modifie pas le design au complet serait de travailler sur les conditions qui ont conduit au blocage et à l'entrée initiale : une vidange déficiente de la fosse (figure 7, 1.1.1.1.1) et une capacité hydraulique inadéquate (figure 7, 1.1.1.1.2.1). L'accident aurait ainsi pu être évité si une des deux solutions suivantes avait été mise en place :

- limiter les blocages en dimensionnant adéquatement le système en fonction de la charge hydraulique réelle. Surveiller la charge hydraulique à l'aide de capteurs et de l'IoT afin de mieux planifier la vidange de la fosse ;
- rendre les points de blocage potentiels accessibles depuis l'extérieur en les plaçant près d'un point d'accès en conjugaison avec l'utilisation d'un outil extensible adapté.

3.1.3 Diminuer l'intensité d'un danger et autres mesures collectives

Avant l'accident, les eaux usées sont restées en stagnation pendant une longue période. Une concentration létale de H₂S était donc présente dans la fosse septique (figure 7, 2.0). Une manière d'aborder le problème est donc de gérer la création d'une atmosphère toxique à la conception. En dehors des systèmes d'assainissement gravitaire conventionnel, il existe par exemple des systèmes d'assainissement sous vide comme on le voit dans les avions. Cette technologie utilise des pompes à vide à pression d'air différentielle pour pomper les eaux usées dans un réservoir de collecte. Avec le circuit fermé, tous les gaz dangereux produits peuvent être collectés puis filtrés (Ciobotici Terryn *et al.*, 2016).

Concernant le risque de chute et le sauvetage, une potence avec palan aurait pu être intégrée à la conception (figure 7, 4.1.1.1). L'entrée de l'espace clos aurait aussi pu être mieux aménagée avec une identification de l'espace clos, une délimitation et une entrée sécurisée (p. ex. échelle fixe).

3.2 Mesures de PIPC théoriques en lien avec les AdC

Les mesures de PIPC proposées lors de l'analyse des dix AdC ont été classées selon les quatre sous-principes définis à la figure 3. Ainsi, le tableau 5 regroupe toutes les mesures liées à l'élimination de l'espace clos par conception. Le tableau 6 présente les mesures qui peuvent aider à réduire ou éviter l'entrée en espace clos. Enfin, le tableau 7 concerne les mesures de PIPC pour réduire le niveau de risque et améliorer l'accès lorsqu'il est toujours requis. Dans chacun des tableaux, les mesures ont été liées à la problématique de conception identifiée avec l'AdC. Pour rappel, cet exercice est théorique même s'il s'applique sur des cas réels.

Tableau 5. Mesures de PIPC issues des AdC en lien avec l'élimination de l'espace clos

Problématique de conception	Catégorie de mesure	Description de la mesure pour supprimer l'espace clos	Référence cause
Éléments nécessitant une intervention hors de portée depuis l'extérieur	Conception alternative	Concevoir une coupe transversale au niveau du point d'intervention afin de pouvoir ouvrir l'espace clos à l'aide d'un vérin telle une porte-papillon	Cas G, 1.1.1
Procédé créant un espace clos	Conception alternative	Installer un système de pompage hors sol	Cas A, 1.1.2.1
Accès à l'intérieur de l'espace possible	Conception alternative	Réduire la taille de l'espace pour empêcher l'occupation humaine et/ou l'entrée	Cas H, 1.2.2.1.1
Technologie obsolète	Automatisation	Intégrer un système d'alimentation automatique	Cas E, 1.1.2.1
Procédé créant un espace clos	Conception alternative	Stocker l'ensilage dans des sacs-silos	Case I, 1.1.1
Procédé créant un espace clos	Conception alternative	Supprimer le trou d'homme et rendre le mécanisme d'actionnement de la vanne accessible	Cas J, 1.2.1.1

Tableau 6. Mesures de PIPC issues des AdC en lien avec l'élimination/la réduction du besoin d'entrer

Problématique de conception	Catégorie de mesure	Description de la mesure pour supprimer/réduire le besoin d'entrer	Référence cause
Éléments nécessitant une intervention hors de portée depuis l'extérieur	Équipement d'inspection	Inspecter en utilisant une caméra depuis l'extérieur	Cas B, 1.1 ; Cas D, 1.1 Cas H, 1.1.1.1
	Accès localisé	Ajouter des trappes d'accès pour accéder aux éléments qui nécessitent une inspection/réparation/mesure	Cas E, 1.1.2.1 Cas I, 1.1.2.1 Cas G, 1.1.1.4.1.3.1.2
		Ajouter une ouverture avec un protecteur transparent pour une inspection visuelle dans l'espace clos	Cas H, 1.1.1.1
	Modification spécifications équipement	Installer une vanne avec une tige d'actionnement	Cas J, 1.2.1.1.1
		Installer des pompes avec des turbines qui limitent le colmatage/l'obturation	Cas A, 1.1.1
	Automatisation	Intégrer un robot pour automatiser le soudage	Cas B, 1.1 Cas C, 2.1.1.1.1.1.2
		Intégrer un système de nettoyage automatique	Cas A, 1.1.2 Cas C, 2.1.1.1.2.1.1.2 Cas G, 1.1.1.4.1.3.1.2
		Ajouter un capteur pour arrêter automatiquement le convoyeur lorsque la quantité de produits est atteinte	Cas E, 1.1.1.1
	Conception alternative	Placer les points de blocage près de l'entrée pour un accès facile de l'extérieur	Cas A, 1.1.2.1.1
	Ajout équipements	Placer une valve en série en dehors de l'espace clos	Cas J, 1.2.1.1.1.1.1.1.1.2
Outil spécifique	Retirer le produit moisi avec un système d'aspiration contrôlé depuis l'extérieur de l'espace clos	Cas I, 1.1.2.1	
	Mettre à disposition un outil adapté (p. ex. : perche, aimant) pour être capable de rester à l'extérieur de l'espace clos	Cas A, 1.1.2 ; Cas E, 1.1.1.2 Cas F, 1.2.2.2 Cas G, 1.1.1.4.1.3.1.2	
Démontage complexe de pièces	Conception alternative	Permettre le prédémontage de pièces ciblées depuis l'extérieur afin de réduire le temps passé à l'intérieur	Cas D, 1.1
Commandes inadéquates	Modification spécifications équipement	Remplacer le type de valve pour limiter les erreurs de manipulation (p. ex. un seul sens possible)	Cas J, 1.2.1.1.1.2
	Surveillance, information	Intégrer l'IoT pour envoyer une alarme sur le téléphone de l'opérateur lorsque l'ensilage est prêt	Cas E, 1.1.1.3.1
	Accès, aménagement	Optimiser la disposition des installations pour permettre aux travailleurs d'effectuer ses travaux à proximité du mélangeur et ainsi d'entendre les alarmes	Cas E, 1.1.1.3.1.1
Ventilation déficiente	Ajout équipements	Installer une ventilation mécanique permanente	Cas I, 1.1.2.1.1.1.3
Colmatage/Blocage	Ajout équipements	Installer un système de vibration industriel permanent	Cas I, 1.1.2.1.1
		Installer une valve de purge pour vider les tuyaux	Cas J, 2.2
Usure	Changement de matériaux	Utiliser un alliage de matériaux alternatif qui nécessite moins d'entretien	Cas C, 1.1.1.1
Évaluation de la situation déficiente	Surveillance, information	Utiliser l'IoT pour surveiller les facteurs environnementaux et de l'état des grains	Cas I, 1.1.2.1.1.1

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

Tableau 7. Mesures de PIPC issues des AdC en lien avec la réduction du niveau de risque et l'amélioration de l'accès

Problématique de conception	Catégorie de mesure	Description de la mesure pour réduire le niveau de risque et améliorer l'accès	Impact sauvetage	Référence cause
Manque d'équipement pour assurer une entrée sécuritaire ou un sauvetage	Points d'ancrage	Installer des points d'ancrage ou une base pour potence et potence à la conception	Positif	Cas A, 4.3.1 Cas B, 4.1.2 Cas C, 1.0 Cas F, 1.3.2 Cas G, 2.2 Cas I, 1.2.2 Cas J, 1.1.3.2
	Accès et aménagement	Prévoir une échelle fixe permanente ou une passerelle dans le respect des normes	Non	Cas A, 4.1.1 Cas J, 1.1.3.1
		Prévoir une surface plane et suffisamment grande autour de l'entrée	Non	Cas J, 1.2.1.1.1
	Augmenter la taille des entrées autant que possible	Positif	Cas A, 4.1.1 Cas J, 1.1.3.1	
Équipements antichute	Intégrer une ligne de vie qui ne dépasse pas la longueur du conduit	Non	Cas G, 1.1.1.4.1.1	
	Sécurité des machines incluant les protecteurs et le cadenassage	Intégrer des points de coupure accessible et locaux pour faciliter le contrôle des énergies	Positif	Cas D, 2.2
Intégrer un protecteur avec interverrouillage pour contrôler l'accès à l'espace clos		Positif	Cas D, 2.1.2 Cas E, 1.1.2 Cas H, 1.3.1	
Assurer une distance de protection adéquate par rapport aux sources de danger		Positif	Cas H, 1.1.2	
Installer une plaque de sécurité selon les principes de l'actionnement positif (commande d'arrêt en position de repos)		Non	Cas E, 2.2.2	
Intégrer un système de clés captives pour démarrer le système avec une séquence prescrite		Non	Cas D, 2.1.2.3	
Accès et aménagement	Modifier la structure pour pouvoir construire un faux plancher surélevé temporaire et éviter d'être dans la zone de danger	Positif	Cas D, 3.0	
Évaluation de la situation déficiente	Accès et aménagement	Sécuriser l'accès à l'entrée de la station de pompage	Positif	Cas A, 3.1
	Surveillance, information	Implanter l'IoT pour surveiller la charge hydraulique/température/humidité du système	Positif	Cas A, 1.1.1.1.2.1 Cas C, 2.1.1.1.2.1.1
		Installer des détecteurs de gaz directement au niveau des ouvertures	Positif	Cas A, 3.1.2 Cas C, 2.1.1.1.1.1.2.2
		Ajouter un avertissement visuel pour indiquer s'il y a des pièces sous tension à l'intérieur	Positif	Cas H, 1.4.2.3
Éclairage	Installer un éclairage permanent	Positif	Cas G, 1.2.2.1	
Défauts dans le système de commande	Système de commande	Identifier adéquatement les commandes	Non	Cas F, 3.2.4.1.2
		Installer un arrêt d'urgence accessible	Non	Cas E, 2.2
		Installer un sectionneur local	Non	Cas H, 1.3.3.1
Ventilation déficiente	Ventilation	Prévoir des événements/ouverture pour la ventilation naturelle et spécifiquement pour installer la ventilation mécanique	Positif	Cas A, 2.0 Cas C, 2.1.1.1.2
Événements imprévus	Modification spécifications équipement	Augmenter le nombre de points de décharge des eaux usées	Non	Case A, 1.1.1.1
		Utiliser une bouteille de gaz inerte dont le volume est inférieur à celui du réservoir (pour éviter de le remplir)	Non	Cas B, 2.3
		Ajouter un interrupteur à l'alimentation de la bouteille de gaz pour la fermer automatiquement après un certain temps	Positif	Cas B, 2.2.1
Accumulation de résidus	Conception alternative	Arrondir l'interception des conduits pour éviter l'accumulation de résidus. Remplacer les matériaux pouvant entrer en contact avec des résidus	Non	Cas G, 1.1.1.4.1.3.1.2.1

3.3 Connaissances acquises avec la méthode des AdC

L'application de la méthode des AdC à des cas réels d'accidents en espace clos a permis de démontrer le potentiel de mesures de PIPC pour éviter des situations à risque. La méthode de l'AdC traduit avec précision la relation entre une conception défectueuse et la survenue d'un accident grave. Le manque d'implication des concepteurs dans la prévention des accidents est d'ailleurs un point largement abordé dans la littérature et qui a été développé avec les experts au chapitre 4 (Kasirossafar et Shahbodaghlou, 2015 ; Behm, 2005 ; Lamba, 2013 ; Gambatese *et al.*, 2017).

Par ailleurs, l'analyse des AdC a permis de dégager plusieurs catégories de lacunes à la conception et donc de principes d'amélioration (1^{re} colonne des tableaux de la section 3.2). À titre d'exemple, on retrouve le fait que le point de déblocage ou de nettoyage prévisible se trouve hors de portée depuis l'extérieur (p. ex. : cas A, C et G). Des accès spécifiques ou des points d'intervention mieux placés peuvent faire partie de la solution à la conception. Parmi les autres pistes de solutions, on retrouve l'automatisation et la surveillance des conditions à l'intérieur de l'espace clos (IoT), des conceptions alternatives (p. ex. : matériaux utilisés, positionnement équipements, type de procédé utilisé) ou encore améliorer l'accès lorsque nécessaire (p. ex. : taille entrée, points d'ancrage).

Toutefois, l'applicabilité des mesures de PIPC proposées dans ce chapitre n'est pas abordée. Par exemple, le système d'assainissement sous vide proposé pour le cas A nécessiterait un investissement initial important, basé sur des considérations spécifiques au site pour être mis en œuvre avec succès (Ciobotici Terryn *et al.*, 2016). Par conséquent, malgré l'efficacité en termes de prévention et les faibles coûts de maintenance d'une telle solution sur le long terme, cette avenue n'est pas forcément viable dans ce contexte (c.-à-d., camping). Les facteurs favorisant et les contraintes quant à l'adoption des mesures de PIPC-EC sont recensés à la section 4.3 à travers les entrevues avec les experts et les études de cas.

Finalement, les solutions proposées dans cette section sont un premier pas vers la base de connaissances visée dans ce projet. Des catégories de mesures et de lacunes à la conception ont été proposées. Toutefois, ce travail doit être raffiné afin de mieux organiser les solutions et de prendre en compte le contexte et les contraintes vécues par les entreprises. C'est ce qui est proposé dans les prochains chapitres.

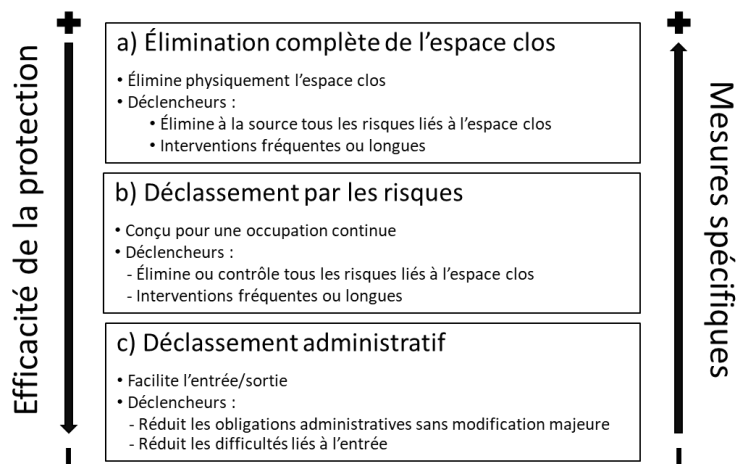
4. RÉSULTATS – RETOUR D'EXPÉRIENCE D'EXPERTS SUR LA MISE EN APPLICATION DE LA PIPC-EC

Ce chapitre présente les résultats des discussions avec les 15 experts en gestion des risques en espace clos rencontrés. Ce chapitre inclut : 1) une classification des mesures de PIPC mentionnées par les experts, ainsi que des informations sur leurs implantations (section 4.1 : déclassement ; section 4.2 : besoin d'entrée) ; 2) les facteurs favorisant et les contraintes exprimés pour l'adoption de telles mesures (section 4.3). Cette section prend en compte le point de vue des utilisateurs des espaces clos ainsi que leur relation avec le concepteur que celui-ci soit en interne à l'entreprise (p. ex. autre département) ou engagé à l'externe. Lorsque pertinent, le nombre d'experts concerné par un résultat est précisé (c.-à-d. x/15). L'ensemble des résultats issus des entrevues est disponible dans González Cortés *et al.* (2021b).

4.1 Déclasser un espace clos à la conception ou lors d'une modification

Concernant les mesures de PIPC applicables, les experts ont d'abord mis l'accent sur la notion de « déclassement » (14/15). Dans ce contexte, l'objectif du déclassement est d'éliminer la notion d'espace clos en travaillant sur un ou plusieurs critères de la définition réglementaire d'un espace clos (cf. section *Concept d'« espace clos »* p. 1). À cet égard, trois options ont été identifiées suite à l'analyse des données recueillies : 1) élimination complète de l'espace clos (critère n°1 de la définition : espace) ; 2) déclassement en travaillant sur les risques (critère n°2 et n°4 de la définition : occupation et risques) ; 3) déclassement administratif (critère n°3 de la définition : accès). Comme présenté à la figure 8, il est important de noter que ces trois options ne sont pas équivalentes en matière de prévention. Par exemple, le déclassement administratif, en travaillant sur l'accès, ne prend pas en compte tous les risques. Ce n'est pas une démarche complète de réduction du risque. Toutefois, chacun des trois déclassements peut apporter un bénéfice en matière de réduction des risques et de productivité. Un espace clos déclassé peut, sous toutes réserves, faciliter la logistique de l'intervention, alléger la documentation et les obligations (p. ex. : surveillant et équipe d'intervention d'urgence sur place). C'est d'ailleurs l'argument principal en faveur d'un investissement pour un déclassement sur le terrain.

Figure 8. Types de déclassement d'un espace clos.



4.1.1 Élimination complète de l'espace clos

Les experts ont déclaré à l'unanimité que « l'élimination complète » de l'espace clos de même que le « déclassement par les risques » étaient très difficiles à mettre en œuvre sur des infrastructures existantes en raison de limitations budgétaires ou de problèmes de compatibilité avec l'environnement existants. De manière réaliste, l'élimination complète est un principe qui s'applique tôt lors de la phase de conception d'un projet afin par exemple de s'assurer de ne pas créer d'espace clos.

Au final, seuls trois experts ont fourni un exemple concret de conception alternative pour une élimination complète d'un espace clos existant. Un des exemples proposés consiste à installer un vérin hydraulique pour soulever la plaque supérieure de l'équipement afin de permettre au travailleur de changer régulièrement le filtre à air sans notion d'entrée en espace clos : « Une fois ouvert, ce n'est plus un espace clos. Cela a permis de supprimer trois entrées par jour, 365 jours par an » (expert n°9). De son côté, l'expert n°14 a expliqué comment les gros réservoirs utilisés pour le traitement thermique du lait se détériorent en raison de contraintes thermiques périodiques (p. ex. fissures). Cela nécessite des entrées pour inspection, nettoyage et réparation. Une conception intrinsèquement sûre consisterait à éliminer ces espaces clos et à les remplacer par une série de stations plus petites pour un traitement plus économe en énergie. Ces petites structures rendent l'occupation humaine impossible et nécessitent moins d'entretien en raison du contrôle progressif de la température qui réduit les contraintes thermiques sur la structure. Ce principe (c.-à-d., espace trop petit pour qu'une entrée soit possible) a également été évoqué par l'expert n°9. Finalement, l'expert n°7 a évoqué un cas de figure où une vanne de régulation avait été placée à la conception dans un espace clos sans que cela se justifie. Lorsque le problème a été identifié, la structure en béton autour de la

vanne a été détruite et remplacée par une cabane. Ces propositions ont des points communs avec celles évoquées au tableau 5 en lien avec l'analyse des AdC.

4.1.2 Déclassement par les risques

Le déclassement de l'espace clos en travaillant sur les risques consiste notamment à modifier l'espace pour une occupation humaine continue. La notion d'« occupation humaine continue » est toutefois sujette à interprétation tout comme la notion de risque acceptable qui est sous-jacente. En outre, la réglementation ne définit pas comment un espace peut être conçu pour une occupation humaine continue. La plupart des textes qui interprètent cette notion incluent l'ajout d'un accès régulier permanent, d'un éclairage permanent et d'une ventilation adéquate permanente comme pour un lieu de travail traditionnel (Ministère du Travail de l'Ontario, 2011 ; Worksafe NB, 2019). Cette démarche doit s'accompagner d'une analyse de risque en bonne et due forme pour être valide (ISO, 2010). C'est l'approche qui a été décrite par quelques experts (4/15) (c.-à-d., escalier, lumière, chauffage, ventilation, analyse des risques). Les autres experts ont seulement abordé la question de l'accès, ce qui n'est pas suffisant pour un déclassement par les risques (cf. déclassement administratif).

À noter que l'ajout de dispositifs permanents dans l'espace (p. ex. : ventilation, éclairage) nécessitera des interventions de maintenance qu'il faudrait anticiper à la conception (p. ex. accès).

4.1.3 Déclassement administratif

Le déclassement administratif est le type de déclassement qui a été le plus abordé lors des discussions, car il s'agit a priori du plus simple à implanter notamment sur un espace clos existant. Il s'agit néanmoins du moins efficace des trois types de déclassement évoqués en matière de prévention puisqu'il ne s'agit pas d'une démarche de prévention des risques complète.

L'objectif du déclassement administratif est de travailler sur la notion d'accès restreint afin de permettre aux travailleurs d'entrer et de sortir sans contrainte ainsi que de ne plus considérer l'espace comme clos selon la réglementation (12/15). Par exemple, l'accès ne pose plus problème pour les opérations de sauvetage. L'expert n°7 a fourni l'exemple d'un déclassement administratif : « Pour améliorer l'accès à la salle des treuils, une partie du toit a été coupée afin qu'un escalier puisse y être installé. L'investissement de 50 000 \$ était justifié, car le travailleur devait y entrer plusieurs fois par jour avec un permis et accompagné d'un surveillant ». Le découpage d'une porte dans un espace clos hors sol est un exemple commun. Ce type de découpage devrait être permanent (p. ex. : porte boulonnée, sur pentures) plutôt que temporaire lorsque possible. Ce type de solution ne s'applique pas à certains espaces clos certifiés (2/15) par exemple.

On peut voir le déclassement administratif comme un « déclassement par les risques » partiel, mais suffisant pour que la définition d'un espace clos ne s'applique plus au regard de la réglementation⁶. Cependant, des risques atmosphériques peuvent toujours être présents, par exemple. Ainsi, il convient de rappeler que cette approche n'est pas une démarche de prévention des risques complète. Une analyse du risque est encore nécessaire pour évaluer la situation dans sa globalité, au-delà de la définition réglementaire d'un espace clos. Il s'agit seulement d'une approche de réduction du risque partielle à placer plus bas dans la hiérarchie des mesures de réduction du risque (voir figure 9).

4.2 Besoin d'entrer

Au-delà du déclassement, l'autre notion qui a été abordée par les experts est celle du besoin d'entrer. Ainsi, suite à l'analyse des données recueillies auprès des experts, le principe du « besoin d'entrer » a été divisé en trois sous-catégories afin de mieux retranscrire l'effet des différentes mesures discutées : l'élimination du besoin d'entrer pour une tâche spécifique, la réduction du besoin d'entrée (principes d'application plus générale) et l'amélioration de l'accès, de l'intervention et de l'évacuation lorsqu'elle est nécessaire.

4.2.1 Éliminer le besoin d'entrer

Le tableau 8 résume les mesures discutées par les experts pour éliminer le besoin d'entrer pour une tâche spécifique (p. ex. : inspection, nettoyage, maintenance). La mise en œuvre, les investissements nécessaires (à titre indicatif seulement) et les prérequis/contraintes (p. ex. compétences techniques) ont été recensés. Selon les experts, l'élimination du besoin d'entrée pour une tâche spécifique est un principe qui peut offrir un bon retour sur investissement. D'ailleurs, toutes les solutions annotées comme « implantées » au tableau 8 nécessitent des modifications structurelles mineures, ce qui réduit considérablement l'investissement initial. L'ensemble des solutions ont comme avantage de réduire le temps d'intervention global en simplifiant la préparation puisqu'il n'y a pas d'entrée. Le désavantage est que ces solutions sont spécifiques à une tâche et n'élimine donc pas toutes les entrées dans l'espace clos visé.

Les experts (8/15) ont largement abordé la robotique (p. ex. drones), les solutions technologiques (p. ex. caméra) et l'automatisation comme solutions potentielles. Les caméras et les mesures non destructives semblent bien implantées. Elles sont considérées comme des technologies matures. Les solutions liées à la robotique et

⁶ Cette approche ne semble plus s'appliquer avec la proposition de modification réglementaire annoncée début 2022 où la notion d'accès restreint n'apparaît plus.

l'automatisation semblent, de leur côté, encore peu implantées au Québec, malgré leur fort potentiel. Les arguments avancés pour justifier le manque d'adoption de ces technologies sont les mêmes que ceux que l'on retrouve dans la littérature à savoir que les drones et les robots sont « coûteux », sensibles aux conditions environnementales, et « nécessitent des connaissances techniques spécialisées » (p. ex. sous-traitant). Cela en fait des solutions encore difficilement envisageables pour les petites et moyennes entreprises (Zarges et Giles, 2008 ; Dandan *et al.*, 2016). Les experts ont d'ailleurs mentionné lors des entrevues plusieurs « outils et équipements » qui se distinguent par leur simplicité et leur coût (p. ex. : perche équipée, sortie possible l'objet de l'intervention, système de jets sous pression multidirectionnels).

Tableau 8. Point de vue des experts concernant les mesures qui éliminent le besoin d'entrer pour une tâche spécifique dans un espace clos

Tâche	Type de mesure	Mesure	Mise en œuvre selon les experts	Indication sur l'investissement nécessaire selon les experts	Avantage	Prérequis, contrainte en lien avec la conception
Inspection	Robotique/Tecnologique	Caméra d'inspection pour environnement industriel	Implanté	Élevé	Réduit le temps d'intervention Peut parfois être utilisé sans arrêter la production	Accès spécifiquement prévus afin de maximiser l'utilisation de ces technologies Expertise spécialisée nécessaire, utilisation en location
		Drones	Rarement implanté	Intermédiaire	Caméra : il est parfois plus rentable d'utiliser et de briser une caméra (conditions sévères) que d'arrêter la production pour une entrée	
		Robot submersible	Rarement implanté	Élevé		
		Essais non destructifs	Implanté	Intermédiaire		
	Outils et équipements	Trappe d'observation et miroir, lecture à distance	Implanté	Faible	Solution simple d'application Réduit le temps d'intervention	Applicable dans des cas spécifiques (p. ex. pas de produits stockés), manque de flexibilité
Nettoyage	Automatisation	Jet d'eau haute pression 3D	Implanté	Intermédiaire	Bon retour sur investissement si interventions fréquentes	Efficace seulement pour certaines configurations (dimensions réduites, pas de zones mortes)
	Automatisation	Système d'air comprimé	Implanté	Intermédiaire	Réduit le temps d'intervention	
Maintenance	Outils et équipements	Sortie de l'équipement concerné sans entrer	Implanté	Faible	Réduit le temps d'intervention Facilite les opérations de maintenance sur l'équipement	Nécessite une entrée de taille suffisante et un dispositif d'assistance intégré pour la manutention
	Outils et équipements	Perche équipée d'outils pour rester à l'extérieur	Implanté	Très faible	Solution simple d'application Réduit le temps d'intervention	Usage limité à des situations spécifiques comme la récupération d'objet
	Aménagement	Organes de service placés à l'extérieur (p. ex. valve)	Rarement implanté	Élevé	Réduit le temps d'intervention Bon retour sur investissement si interventions fréquentes	Modification qui nécessite une réingénierie et donc un investissement initial important
	Automatisation	Organes de service avec actuateur (p. ex. valve)	Implanté	Intermédiaire	Actionneurs polyvalents, durables qui offrent des options de sécurité	Usage limité dû à la compatibilité avec l'environnement et la nécessité d'une source d'énergie
	Robotique/Technologique	Robot pour le soudage	Rarement implanté	Élevé	Permet de réparer des endroits difficilement accessibles (p. ex. espace clos dans un espace clos)	Accès spécifiquement prévus afin de maximiser l'utilisation Expertise spécialisée nécessaire

4.2.2 Réduire la fréquence et la durée des entrées

Le tableau 9 présente les moyens de PIPC discutés par les experts qui ont le potentiel de réduire la fréquence ou la durée d'une intervention sans toutefois complètement supprimer une entrée pour une tâche spécifique. Ces solutions sont moins spécifiques que celles du tableau 8. Il s'agit plutôt de principes généraux qui s'appliquent dans différents contextes. La mise en œuvre, les investissements nécessaires et les prérequis/contraintes ont été recensés.

Concernant la diminution de la fréquence d'entrée, les mesures intègrent principalement des solutions pour prévenir la dégradation de la structure ou l'accumulation de résidus (blocage), deux déclencheurs d'entrées fréquents (10/15). Concernant la durée, on note des solutions qui facilitent la tâche (p. ex. changement simplifié de pièces qui se dégradent).

4.2.3 Améliorer l'accès, l'intervention et l'évacuation lorsque requis

Le tableau 10 présente un résumé des moyens de PIPC exprimés par les experts qui ont le potentiel d'améliorer l'accès, l'intervention et l'évacuation d'un espace clos lorsqu'ils sont nécessaires. Dans cette catégorie de mesures, les experts ont mis l'accent sur les caractéristiques des ouvertures (p. ex. : taille, conique qui s'élargit vers l'intérieur), leur nombre, leur positionnement ainsi que l'aménagement autour de l'entrée (10/15). Ils ont notamment précisé que la taille des ouvertures pour les nouvelles installations est en général de l'ordre de 508 mm (diamètre ou petit côté) (8/10). En se référant aux sections 4.3 à 4.5 de la norme ISO 15534-1 (ISO, 2011) et à la section 5.7.7.2 de la norme MIL-STD-1472F (US Department de la Défense, 1998), il semble que les concepteurs aient suivi les exigences minimales sur les dimensions des entrées. Toutefois, selon les normes susmentionnées, ces valeurs minimales ne sont pas suffisantes dans le contexte des espaces clos. Les dimensions doivent être ajustées en prenant en compte la complexité des mouvements, les vêtements de protection et la possibilité de porter un APR autonome en cas de sauvetage. À titre d'exemple, dans le cas d'une ouverture circulaire avec un homme dans le 95^e percentile et les ajustements susmentionnés, le diamètre ne devrait pas être inférieur à 977 mm selon la norme ISO 15534-1 ou 1192 mm selon la norme MIL-STD-1472F (États-Unis) (ISO, 2011 ; US Department de la Défense, 1998 ; González Cortés *et al.*, 2021b).

Tableau 9. Point de vue des experts concernant les mesures qui réduisent la fréquence ou la durée d'intervention en espace clos

Type de mesure	Mesure	Effet	Mise en œuvre selon les experts	Coût de selon les experts	Avantage	Prérequis, contrainte en lien avec la conception
Aménagement intérieur	Privilégier des équipements boulonnés plutôt que soudés (pièces qui se dégradent)	Durée	Implanté	Faible	Plus facile de remplacer les équipements même si les boulons sont corrodés	Dépendant du cahier des charges en matière de résistance, de poids, de résistance thermique, etc. durant tout le cycle de vie
	Augmenter les pentes pour l'écoulement (2 %)	Fréquence et durée	Implanté	Intermédiaire à élevé	Améliore le drainage et le nettoyage de la matière en écoulement libre, réduit les blocages	
	Arrondir les angles pour éviter les « zones mortes »		Implanté	Intermédiaire à élevé		
Matériaux	Utiliser des alliages avec un coefficient de friction faible	Fréquence	Implanté	Élevé	Réduit le nombre d'interventions de maintenance dues à une détérioration des matériaux	Expertise spécialisée nécessaire. Investissement important
	Utiliser des alliages qui résistent à la corrosion		Implanté	Élevé		
Automatisation	Asservir pour un contrôle progressif de la température	Fréquence	Rarement implanté	Élevé	Réduit le nombre d'interventions dues à une détérioration non anticipée	Intégration nécessaire à la phase de conception
	Maintenance préventive avec capteurs	Fréquence	Implanté	Faible		

Tableau 10. Point de vue des experts concernant les mesures qui améliorent l'accès, l'intervention et l'évacuation

Type de mesure	Mesure	Mise en œuvre selon les experts	Coût de selon les experts	Avantage	Prérequis, contrainte en lien avec la conception
Aménagement de l'entrée	Augmenter la taille de l'entrée, faire des ouvertures coniques plutôt que cylindriques	Implanté	Intermédiaire à élevé	Améliore l'accès et les opérations de sauvetage.	Dépendant du cahier des charges en matière de résistance structurelle. Il peut être nécessaire de refaire un cadre autour de l'entrée
	Augmenter le nombre d'entrées. Prévoir des accès au plus près de l'intervention	Implanté	Intermédiaire à élevé	Réduit le temps d'intervention	
	Positionner les ouvertures pour limiter les risques (p. ex. réservoir : horizontal, niveau du sol)	Implanté	Intermédiaire à élevé	Réduit les risques de chute. Améliore l'utilisation d'équipements antichute	
	Prévoir des entrées/trappes séparées selon leur fonction (p. ex. : ventilation, secours)	Implanté	Faible	Évite l'encombrement de l'entrée principale	
	Ajouter des grilles sous le couvercle d'entrée pour empêcher la chute d'objets à risque (entrée verticale, espace public)	Implanté	Faible	Empêche des objets dangereux (p. ex. seringues contaminées) de tomber réduisant ainsi les risques biologiques	
Aménagement autour de l'entrée	Prévoir des socles permanents pour l'installation de garde-corps et de potences	Implanté	Faible	Réduit le temps d'intervention et facilite la préparation de l'entrée	Capacité de 5 000 lb (22 kN) requise (ANSI et ASSE, 2014)
	Prévoir des points d'ancrage permanents	Implanté	Faible		
Outils et équipements	Intégrer des ouvertures pour l'installation de la ventilation permanente adaptée	Implanté	Intermédiaire à élevé		À la conception. Calcul pour maximiser le positionnement

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

4.3 Difficultés à l'adoption de mesures de PIPC et suggestions

Les experts ont largement abordé les raisons pour lesquelles les mesures de PIPC sont adoptées ou non sur le terrain. Ainsi, le tableau 11 présente de manière synthétique les facteurs favorisant et les contraintes exprimés par les experts quant à l'adoption de mesures de PIPC-EC. Des données issues des entrevues lors des 19 études de cas (chapitre 5) ont également été intégrées.

Tableau 11. Facteurs favorisant et contraintes quant à l'adoption de mesures de PIPC-EC exprimés par les experts et lors des études de cas

	Contrainte (argumentaire) →	Facteur favorisant (explication)
	Manque d'orientation : <ul style="list-style-type: none"> - Manque de référence sur l'implantation de mesures de PIPC. - Difficultés à interpréter les règlements, certaines définitions sont vagues notamment dans une intention de déclassement (p. ex. : accès restreint, occupation humaine continue). 	Guides : <ul style="list-style-type: none"> - Partager les connaissances sur l'application de mesures PIPC et les innovations. Le présent rapport tente de répondre en partie à ce besoin.
Concepteur (externe ou interne)	Lacunes du concepteur : <ul style="list-style-type: none"> - Les concepteurs ne prennent pas en compte tout le cycle de vie de l'espace clos et n'anticipent pas la maintenance sous l'angle de la SST des intervenants. - Habituellement, le RSST n'est pas une référence utilisée par le concepteur. - Les concepteurs peuvent avoir tendance à reproduire les projets, à ne pas innover en termes de SST. 	Relation utilisateur-concepteur engagée : <ul style="list-style-type: none"> - Anticiper les tâches de maintenance, entamer la discussion le plus en amont afin de diminuer les interventions et les risques en espace clos, mais aussi de mieux maîtriser le procédé. - Intégrer un processus d'analyse du risque à l'étape de conception/modification ainsi qu'à la livraison. - Avoir un processus de livraison bien établi (de l'étude préparatoire à la prise en main des opérations) avec un partage d'informations efficace entre les différentes parties prenantes. - Inciter le concepteur à suivre son ouvrage dans le temps pour apprendre et innover pour les phases hors production (p. ex. : maintenance, déblocage).
Utilisateur, propriétaire	Justification de l'investissement parfois difficile. Anticipation d'un travail coûteux, peu applicable : <ul style="list-style-type: none"> - Il faut que le problème SST vaille la peine d'investir (p. ex. : risques élevés, entrées fréquentes). Dans le cas contraire (ex. : pas d'incident, entrées peu fréquentes), il est difficile de justifier un investissement et on continuera de faire comme avant (ex. EPI). Cela est particulièrement vrai pour les petites entreprises. - Il n'est pas toujours possible de procéder autrement à cause de contraintes techniques (p. ex. équipements sous-pression), d'espace disponible, de recertification de l'équipement, etc. - Les solutions technologiques ont du potentiel (ex. : automatisation, robotique), mais elles coûtent chères, demandent des spécialistes et ne règlent pas forcément tous les problèmes d'entrée. 	Planification à long terme : <ul style="list-style-type: none"> - Mettre en place une culture d'entreprise, approche de prévention et d'amélioration continue : support de la direction, investissements (ressources humaines et matérielles), écoute du terrain et être prêt à faire évoluer ses façons de faire. - Avoir une politique d'achat et de conception pour intégrer les mesures de PIPC le plus en amont possible (ex. ne pas créer d'espace clos). Impliquer le responsable SST dans les projets de conception. - Considérer l'espace clos sur tout le cycle de vie. Calculer le retour sur investissement d'ajouts pour la SST sur le long terme pour être en mesure de justifier les modifications. - Avoir des interlocuteurs stables en interne puisque cela nécessite de l'expérience et du vécu pour valider les éléments de sécurité à la conception en tant qu'utilisateur.
	Planification à court terme, manque de temps et d'anticipation : <ul style="list-style-type: none"> - Manque de temps et de planification. Absence d'un processus de communication dès le départ. - Pas l'habitude de se poser la question si les entrées sont vraiment nécessaires ou évitables. - Décisions sur le court terme et report du problème. C'est le cas par exemple dans un contexte de plus bas soumissionnaire. - La SST est souvent l'élément qui est mis de côté si on manque de temps. On essaye de le rattraper ensuite. 	

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

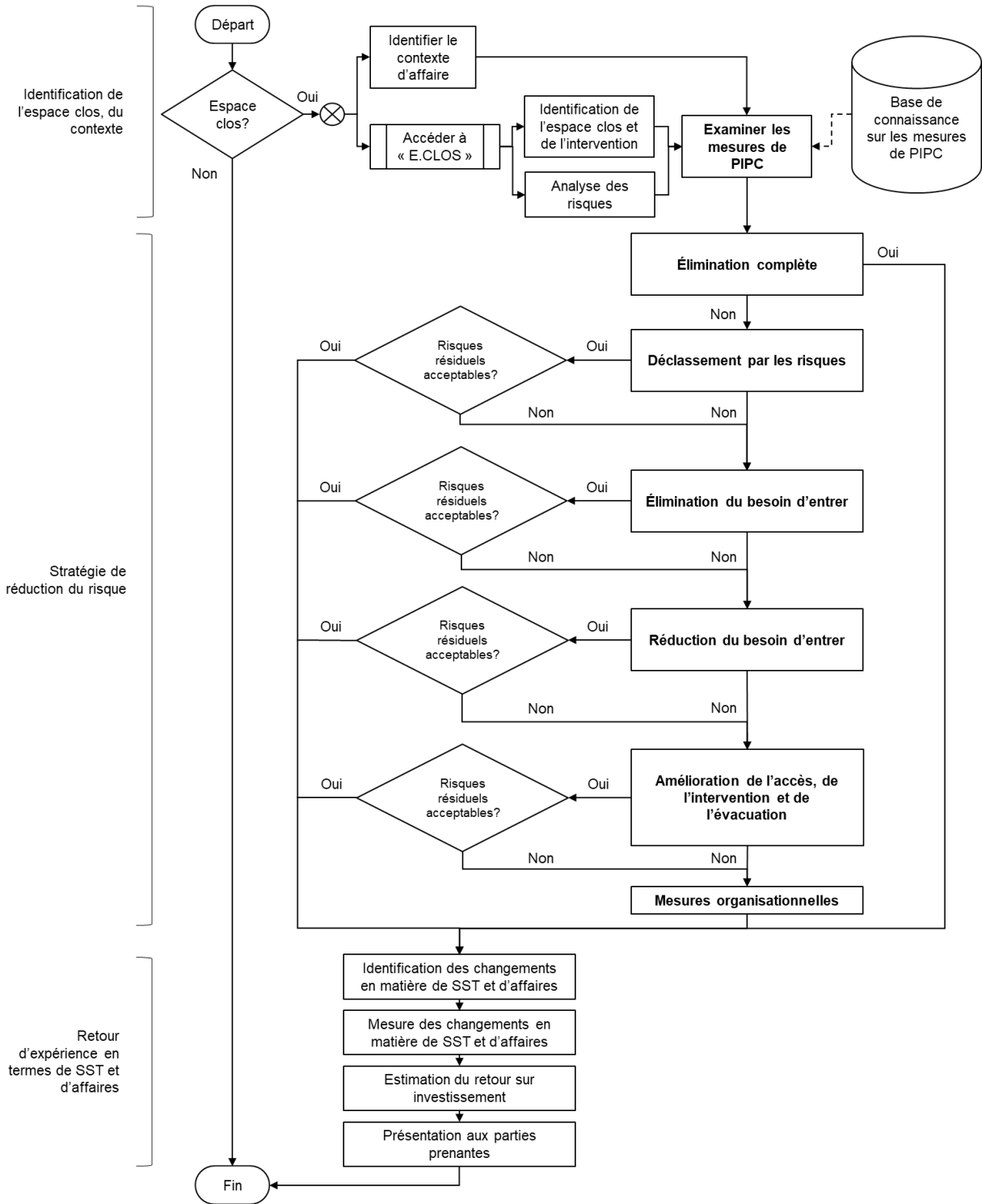
Contrairement aux résultats qui abordent des contraintes associées à des solutions spécifiques (tableau 8 à tableau 10), les éléments de réflexion du tableau 11 sont de plus haut niveau :

- Manque de connaissances pratiques disponibles. Globalement, les experts étaient sensibilisés aux mesures de PIPC-EC. Ils ont majoritairement décrit des mesures concernant le besoin d'entrer (14/15) et l'amélioration de l'accès (12/15). Le principe de l'élimination complète a été moins abordé (8/15). Le manque d'information exprimé semble plutôt concerner la mise à disposition de guides pour les concepteurs et les propriétaires sur la mise en application de ces mesures (p. ex. : déclassement par les risques, taille des entrées).
- Prise en compte partiel du cycle de vie (concepteur). L'un des principaux freins à l'adoption des mesures de PIPC est la prise en compte partielle du cycle de vie d'un espace clos par le concepteur. Les interventions de maintenance et donc les entrées en espace clos ne sont pas anticipées comme elles le devraient afin de minimiser les risques et la fréquence d'entrée. Le problème est reporté sur l'utilisateur (propriétaire) qui doit appliquer les obligations réglementaires du RSST ou du CSTC. Ainsi, la relation utilisateur-concepteur est primordiale à ce stade-ci pour identifier les enjeux SST sur toutes les phases de vie de l'équipement notamment par l'intermédiaire d'une analyse de risque co-construite. Plus le problème est identifié tôt à la conception, plus il sera possible de le minimiser.
- Difficulté de justifier les investissements, planification à court terme, report du problème (utilisateur). L'ajout de mesures pour la SST que ce soit à la conception ou en modification est souvent vu comme une dépense supplémentaire pour l'utilisateur. Généralement, une plus grande priorité est accordée aux facteurs économiques ou de performance (Gauthier *et al.*, 2021). Les aspects de SST seront souvent les premiers mis de côté dans un projet, faute de temps ou de budget en espérant pouvoir les rattraper plus tard (4/15). Le problème associé est donc une planification à court terme à cause d'un budget limité. Il y a aussi le fait que le retour sur investissement est principalement basé sur la prévention des accidents (Morrison, 2008 ; Lanoie et Tavenas, 1996). Toutefois, dans le contexte des espaces clos, en limitant les entrées à la conception, on limite aussi les arrêts de production prolongés. Les gains potentiels vont donc au-delà de la SST et concernent aussi la productivité et la rentabilité en considérant le long terme (Tompa *et al.*, 2013). En tant qu'utilisateur/propriétaire d'espace clos, avoir une planification à long terme peut se traduire par une politique d'achat et de conception afin d'intégrer les mesures de PIPC le plus en amont possible (p. ex. ne pas créer d'espace clos), mais aussi en impliquant le responsable SST dans les projets de conception/modification des opérations.

4.4 Connaissances acquises avec les experts

Les entrevues avec les experts, tout comme l'analyse des accidents mortels avec la technique des AdC, ont permis de préciser les principes associés à la PIPC-EC. La figure 9 adaptée de González Cortés *et al.* (2021b) propose un diagramme en ce sens. Il s'agit d'une évolution des sous-principes de PIPC-EC présentés à la figure 3. En relativisant la porte du déclasserement administratif et en le considérant comme un exemple spécifique de l'amélioration de l'accès, la hiérarchie des principes de PIPC proposée est donc la suivante : 1) éliminer complètement l'espace ; 2) déclasser en travaillant sur les risques ; 3) supprimer l'entrée pour une tâche spécifique ; 4) réduire le besoin d'entrer de manière générale ; 5) améliorer l'accès, l'intervention et l'évacuation. À chaque étape, si les risques résiduels ne sont pas acceptables, il faut envisager le principe suivant.

Figure 9. Mise en œuvre des mesures de PIPC-EC pour une intervention spécifique (adaptée de González Cortés et al., 2021b).



IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

Il est nécessaire que l'application de cette logique de réduction du risque soit précédée par une analyse du risque préliminaire à l'aide d'un outil dédié tel que E.CLOS (section *État des pratiques de réduction du risque sur le terrain p. 6*) (Burlet-Vienney *et al.*, 2015b). Cet outil génère une liste complète des risques associés à l'espace clos, son environnement et l'intervention à effectuer en se basant sur les réponses à deux questionnaires dédiés. D'ailleurs, une démarche de déclassement d'un espace clos devrait toujours s'appuyer sur une démarche complète d'évaluation du risque et non sur une approche basée sur l'interprétation de la définition réglementaire d'un espace clos.

Il est également nécessaire d'identifier le contexte d'affaires associé à l'espace clos. Par exemple, le type d'industrie et d'activités peut dicter les règles de conception, la criticité de l'équipement dans la chaîne de production, le nombre d'entrées requis pour respecter les normes, etc. Ces éléments peuvent être déterminants dans l'adoption de mesures de PIPC (p. ex. justification du retour sur investissement). À ce sujet, une prise en compte de l'ensemble du cycle de vie de l'espace clos par le concepteur, une planification à long terme des investissements par l'utilisateur et un engagement dans la relation concepteur-utilisateur concernant la SST sont des leviers importants selon les experts.

Comme mentionné à la figure 9, l'application des principes de PIPC devrait être supportée par une base de connaissances afin de guider les choix des utilisateurs (propriétaires) et des concepteurs. Les exemples d'experts ainsi que les suggestions faites à l'aide des AdC sont un premier pas et offrent déjà quelques solutions à l'intention des concepteurs et des propriétaires d'espaces clos. Les études de cas présentées au chapitre suivant ont toutefois permis de bâtir une base de connaissances en bonne et due forme en alliant une solution à un contexte d'utilisation précis et réel, ce qui n'était pas toujours le cas avec les experts. Le codage de la base de connaissances a été structuré en s'appuyant sur la hiérarchie des principes de PIPC présentée à la figure 9 ainsi que les problèmes de conception identifiés avec les AdC. Les suggestions de solutions faites du tableau 5 au tableau 10 ont servi lors des discussions lors des études de cas avec les entreprises.

5. RÉSULTATS – ÉTUDES DE CAS ET BASE DE CONNAISSANCES

Ce chapitre présente la base de connaissances développée à l'aide des 19 études de cas et des précédentes étapes du projet selon les éléments méthodologiques décrits à la section 2.4.3. Ce chapitre inclut une description des différentes tables de la base de données relationnelles (base de connaissances) selon les entités décrites à la figure 5. Par la suite, en se basant sur ces tables, les 112 solutions compilées dans la base de connaissances sont décrites par type d'espace clos. Cette présentation des tables et des solutions a été simplifiée, car il est difficile de transcrire la richesse d'une base de données dans un rapport de recherche. Elle permet toutefois de rendre disponible une partie importante de l'information contenue dans la base de connaissances. Le fichier Excel© est un livrable du projet qu'il conviendra d'exploiter dans une activité de valorisation subséquente.

5.1 Tables constitutives de la base de connaissances

Dans la base de connaissances, chacune des solutions issues des études de cas a été associée à un principe général de PIPC-EC tel que défini à la figure 9 (P1-P5, tableau 12) et à un contexte précis avec un type d'espace clos (tableau 4) et un type d'intervention (tableau 13). Les solutions ont également été caractérisées en les associant à un type de mesures de réduction du risque (M1-M17, tableau 14), une caractéristique de conception problématique tirée de l'analyse des accidents (PD1-PD13, tableau 15) et des types de contraintes techniques et organisationnelles (T0-T12, G0-G8, tableau 16). À noter que la base de connaissances définit également les composantes du risque impactées par la solution proposée (c.-à-d. origine du phénomène dangereux, intensité du phénomène dangereux, fréquence ou durée d'exposition au phénomène dangereux).

La présentation de ces tables est nécessaire pour une description plus complète des 112 solutions présentées à la section 5.2. Ces tables sont également un résultat en tant que tel, car elles permettent de catégoriser à la fois les types de mesures possibles dans un contexte de PIPC-EC, les types de problèmes de conception et les principales contraintes d'implantation. Il s'agit en quelque sorte d'une synthèse de situations pour une utilisation des PIPC-EC. Ces catégorisations sont issues du travail de taxonomie sur les données récoltées en se basant sur les précédentes étapes du projet.

Tableau 12. Table des principes de PIPC-EC associés aux solutions de la base de connaissances

Principe de PIPC-EC	
Principe_ID	Description du principe
P1	Élimination complète
P2	Déclassement par les risques
P3	Élimination du besoin d'entrer pour une tâche spécifique
P4	Réduction du besoin d'entrer
P5	Amélioration de l'accès, de l'intervention et de l'évacuation

Tableau 13. Table des types d'intervention associés aux solutions de PIPC-EC de la base de connaissances

Type d'intervention		
Int_ID	Définition	Description
UN	Débouchage (unclog)	Retrait de matière accumulée pour rétablir un écoulement.
RE	Décoincage/Déblocage (release)	Retrait d'un élément qui empêche le mouvement d'une pièce, d'une machine.
PW	Nettoyage à pression (pressure washing)	Nettoyage à haute pression ou à pression contrôlée pour éliminer des débris ou des résidus accumulés.
RW	Réparation structurelle avec soudure (structural repairs by welding)	Réparation sur la structure de l'espace clos ou d'un élément connexe par soudage (travail à chaud).
RO	Réparation structurelle autre (structural repairs others)	Réparation sur la structure de l'espace clos ou d'un élément connexe sans soudage.
IM	Maintenance de nature mécanique (internal mechanical equipment maintenance)	Maintenance sur des composantes mécaniques à l'intérieur de l'espace clos.
IE	Maintenance de nature mécanique (internal electrical equipment maintenance)	Maintenance sur des composantes électriques à l'intérieur de l'espace clos.
VI	Inspection visuelle (visual inspection)	Inspection pour détecter des défauts structurels visibles à l'intérieur de l'espace clos.
II	Inspection structurelle (integrity inspection)	Inspection pour détecter des défauts structurels non visibles à l'intérieur de l'espace clos.
MR	Enlèvement de matière (material removing)	Retrait de matière accumulée dans l'espace clos à l'aide d'une force mécanique.
CO	Revêtement de surface (coating)	Application d'un revêtement de surface à l'intérieur de l'espace clos.
SB	Sablage (sandblasting)	Traitement de surface par abrasion au sable
PR	Utilisation d'une sonde (probing)	Échantillonnage ou détection de niveau
AE	Toutes entrées nécessaires	Combinaison de plusieurs types d'interventions
IH	Maintenance sur le système hydraulique (internal hydraulic equipment maintenance)	Maintenance sur des composantes du système hydraulique à l'intérieur de l'espace clos.

Les types de mesures associées aux solutions de PIPC-EC au tableau 14 peuvent être regroupés de la manière suivante :

- (i) élimination de l'espace clos (M6) ;
- (ii) limitation du besoin d'entrer par de la surveillance (M1, M13), des accès localisés proche du point d'intervention (M2), l'automatisation de la tâche (M3) ou l'utilisation d'équipement robotique (M14), une autre méthode de travail par des

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

modifications à la conception (M7) ou l'utilisation d'outils (M8) et enfin des matériaux ou des revêtements plus adaptés au contexte (M10 et M15) ;

(iii) amélioration de l'accès et de l'intervention incluant le risque de chute (M5) et le travail à l'intérieur (M4, M8, M17) ;

(iv) plus globalement, amélioration de la performance des équipements en amont de l'espace clos (M11), du système de commande (M9) et de la sécurité des machines (M12).

Tableau 14. Table des types de mesures de réduction du risque associées aux solutions de PIPC-EC de la base de connaissances

Type de mesures de réduction du risque			
Mesure_ID	Description de la mesure	Mesure_ID	Description de la mesure
M1	Surveillance – Équipements d'inspection spécialisés	M10	Changement de matériaux
M2	Accès localisé pour une inspection, une réparation ou la ventilation	M11	Équipements/accessoires intégrés à l'infrastructure pour améliorer la performance
M3	Automatisation du procédé	M12	Sécurité des machines incluant les protecteurs et le cadenassage
M4	Aménagement de la configuration intérieur de l'espace clos	M13	Surveillance - Capteurs
M5	Aménagement de l'entrée de l'espace clos incluant le risque de chute	M14	Utilisation d'équipement robotique
M6	Conception alternative (procédé alternatif)	M15	Revêtement de surface
M7	Méthode de travail alternative par une modification à la conception	M16	Action préventive d'ordre organisationnel
M8	Utilisation d'outils/accessoires spécifiques pour rester à l'extérieur ou faciliter la tâche à l'intérieur	M17	Redondance des installations
M9	Conception du système de commande/Interface		

Les types de problèmes de conception associés aux solutions de PIPC-EC au tableau 15 peuvent être regroupés de la manière suivante : (i) problème d'accessibilité au point d'intervention (PD1, PD2, PD3, PD10) ; (ii) non-anticipation de dégradation à l'intérieur de l'espace clos (PD9, PD11, PD12, PD 13) ; (iii) présence de phénomène dangereux (PD5, PD8) ; (iv) lacunes du système de commande ou autres (PD4, PD6, PD7).

Tableau 15. Table des caractéristiques de conception problématiques associées aux solutions de PIPC-EC de la base de connaissances

Caractéristique de conception problématique			
Design_ID	Description du problème	Design_ID	Description du problème
PD1	Éléments ciblés lors de l'intervention hors de portée à l'intérieur de l'espace clos	PD8	Phénomènes dangereux atmosphériques intrinsèques
PD2	Entrée, déplacement dans un espace clos difficile en raison de la configuration	PD9	Évènements imprévus dus à des équipements internes
PD3	Espace clos dans un espace clos	PD10	Démontage préalable pour atteindre les éléments ciblés lors de l'intervention
PD4	Technologie obsolète	PD11	Colmatage possible (fluide)
PD5	Source du phénomène dangereux pas isolée/contrôlée	PD12	Blocage possible (mécanique)
PD6	Informations sur l'état du système non disponibles	PD13	Corrosion et dégradation des matériaux
PD7	Défauts dans la conception du système de commandes incluant l'interface		

Les types de contraintes techniques identifiés associés aux solutions de PIPC-EC au tableau 16 peuvent être regroupés de la manière suivante : (i) manque de compatibilité avec la structure existante (T2, T3, T4, T7, T11) ; (ii) problème d'efficacité (T5, T6, T8) ; (iii) ajout de risques (T9, T12) ; (iv) manque de connaissances (T1, T10). Les types de contraintes organisationnelles identifiés peuvent être regroupés de la manière suivante : (i) coût/rentabilité de la solution (G1, G4) ; (ii) question de la garantie (G3, G8) ; (iii) manque de contrôle sur la situation (G2, G5, G6, G7).

Tableau 16. Tables des contraintes techniques et organisationnelles associées aux solutions de PIPC-EC de la base de connaissances

Contraintes techniques		Contraintes organisationnelles	
Tech_ID	Description	Org_ID	Description
T0	Aucune contrainte mentionnée	G0	Aucune contrainte mentionnée
T1	Pas un produit standard/common	G1	Problème de rentabilité
T2	Problème de compatibilité avec l'environnement/les équipements existants	G2	Opération de la solution sous-traitée
T3	Espace clos en souterrain (paroi non accessible par l'extérieur)	G3	Nécessite une nouvelle certification de conformité de l'équipement
T4	Contraintes d'espace pour la construction/modification	G4	Travaux de recherche et développement importants
T5	Problème de performance, d'efficacité par rapport à une intervention manuelle	G5	Problème d'approvisionnement de l'équipement
T6	Manque de flexibilité par rapport aux opérations	G6	Contraintes liées aux comportements/demandes du client
T7	Solution qui nécessite l'ajout d'un équipement important à l'existant	G7	Nécessite des conditions climatiques favorables
T8	Problème de fiabilité associée à la solution	G8	Clauses de garantie à respecter
T9	Problème de manutention/mobilité de la solution		
T10	Manque de connaissances techniques sur la solution		
T11	Nécessite une modification complète du processus		
T12	Introduit de nouveaux risques		

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

5.2 Tables des solutions de PIPC-EC par types d'espace clos

Afin de présenter les 112 solutions recensées de manière cohérente, un découpage par le type d'espace clos a été choisi (sections 5.2.1 à 5.2.5). Cette décision s'explique par le fait que la catégorie « type d'espace clos » permet de regrouper des solutions qui ont un contexte physique et organisationnel commun tout en étant un découpage concret pour le lecteur. La catégorie « type d'espace clos » telle que présentée au tableau 4 (4^e colonne) est un découpage basé à la fois sur la fonction de l'espace clos (p. ex. : stockage, accès, machine/procédé) et ses caractéristiques physiques (p. ex. : ouvert/fermé, souterrain/hors sol, restreint/volumineux). Cette approche, bien qu'imparfaite, a l'avantage d'être pragmatique, d'avoir une bonne validité apparente tout en ventilant convenablement les solutions dans un nombre restreint de catégories.

Ce découpage a donc conduit à la création de cinq types d'espace clos :

- les chambres/trous d'homme/puits d'accès (section 5.2.1, tableau 17) sont des espaces clos souterrains utilisés pour l'accès à des équipements ;
- les réservoirs (section 5.2.2, tableau 18) sont des espaces clos fermés utilisés principalement pour le stockage et le transit de produits liquides ou solides. Ils peuvent être fixes ou mobiles ;
- les bassins (section 5.2.3, tableau 19) sont l'équivalent des réservoirs (stockage), mais sont des espaces clos ouverts ;
- les cheminées (section 5.2.4, tableau 20) sont des espaces clos ouverts de grande hauteur pour évacuer des gaz ;
- les espaces clos qui correspondent à l'intérieur d'équipements industriels (section 5.2.5, tableau 21) sont fermés, généralement de grandes dimensions et ils contiennent de la machinerie au sens large.

Chaque tableau associé à un type d'espace clos présente une description de la solution (Sol_Nom, Sol_Desc), ses avantages (Sol_Av) ainsi que le code associé aux principes généraux de PIPC-EC (Principe_ID, tableau 12), aux types d'espace clos de l'échantillon (EC_ID, tableau 4), aux types d'intervention (INT_ID, tableau 13), aux types de mesures de réduction du risque (Mesure_ID, tableau 14), aux caractéristiques de conception problématiques (Design_ID, tableau 15) et aux types de contraintes techniques et organisationnelles (Tech_ID et Org_ID, tableau 16). Les solutions sont triées dans les tableaux d'abord par principes généraux de PIPC-EC (P) puis par types de mesures (M). Des solutions relativement proches peuvent se retrouver dans plusieurs types d'espace clos, mais dans différents contextes (p. ex. : caméra 360° pour l'inspection, ancrage et

socle pour potence permanents). Le numéro des solutions (Sol_ID) est indiqué dans le texte sous la forme [n° 00].

Des sous-groupes d'espaces clos ont été indiqués dans chacun des cinq types d'espace clos pour présenter des exemples de solutions de manière encore plus ciblée. La colonne EC_ID permet de repérer les espaces clos mentionnés.

À noter que les détails liés aux contraintes techniques et organisationnelles sont disponibles en annexe pour des questions de simplification de présentation de l'information (tableau 24).

5.2.1 Chambre, trou d'homme, puits d'accès

Les exemples d'espaces clos obtenus inclus dans la catégorie « Chambre, trou d'homme, puits d'accès » peuvent être répartis en 3 principaux sous-groupes : les puits d'accès notamment électrique et égout (EC_ID : 1, 7, 13 et 30), les chambres de régulation de pression (distribution des eaux) (EC_ID : 6) et les postes de pompes (EC_ID : 8). Les 34 solutions évoquées sont notamment (tableau 17) :

- Puits d'accès (EC_ID : 1, 7, 13 et 30) : supprimer l'espace clos en le remplaçant par des raccordements hors sol [n° 1] ; intégrer l'espace clos dans une galerie technique pour occupation humaine [n° 2] ; diminuer le besoin d'entrer par l'utilisation de caméra 360° [n° 6], des structures préfabriquées lors de la construction [n° 14], l'utilisation de la fibre de verre pour le support des câbles (pas de corrosion) [n° 18] ; améliorer l'accès et l'intervention par l'ajout d'une 2^e ouverture [n° 21] (figure 10), le peinturage en blanc [n° 31] et la gestion des chutes d'objets (p. ex. panier pour les seringues) [n° 29, 32].
- Chambre de régulation (EC_ID : 6) : supprimer l'espace clos avec un cabinet hors terre (hotbox) [n° 3] ; aménager l'espace clos pour une occupation humaine [n° 4] ; diminuer le besoin d'entrer par le déplacement des équipements électriques/électroniques hors de la chambre [n° 15] ; améliorer l'accès et l'évacuation par l'installation de trappes et de socle de potence pour le risque de chute [n° 26-27].
- Poste de pompage (EC_ID : 8) : aménager un palier intermédiaire prévu pour une occupation humaine [n° 5] ; diminuer le besoin d'entrer avec l'accès aux équipements depuis l'extérieur (p. ex. pompe amovible) [n° 8], la réduction de l'accumulation de déchets au fond du poste (p. ex. : panier dégrilleur, aménagement du fond) [n° 12, 19] et un meilleur contrôle du débit par la séparation des réseaux pluviale et sanitaire [n° 16] ; améliorer l'accès et de l'intervention et de l'évacuation par l'ajout d'un palier intermédiaire pour l'accès à la partie mécanique [n° 22], d'une

échelle droite pour faciliter le sauvetage [n° 28] et des points de coupure cadenassables [n° 33].

Figure 10. Vue intérieure d'un puits d'accès électrique, présence d'une 2^e ouverture pour le pompage de l'eau et la ventilation (ED_ID : 1; solution n° 21).



Tableau 17. Solutions de la base de connaissances associées au type d'espace clos « Chambre, trou d'homme, puits d'accès »

Sol_ID	Principe_ID	Mesure_ID	Design_ID	EC_ID	Int_ID	Sol_Nom	Sol_Desc	Sol_Av	Tech_ID	Org_ID
1	P1	M6	PD1	1	AE	Poste électrique hors sol	Création de locaux techniques ou liés à un bâtiment plutôt que d'avoir des puits d'accès électrique	Supprime les puits d'accès électrique. Toutefois, cette solution est souvent difficilement envisageable en milieu urbain pour des raisons d'espace, d'urbanisme et de sécurité	T4	G6
2	P1	M6	PD1	1	AE	Galerie technique	Création d'une galerie technique avec accès, ventilation, lumière en remplacement de plusieurs puits d'accès électrique sous certaines rues	Supprime les puits d'accès électrique. Toutefois, cette solution se limite au nouveau projet et est difficile à coordonner et justifier	T4	G6
3	P1	M6	PD1	6	AE	Chambre de régulation de pression hors terre (hotbox)	Chambre de régulation de pression construite hors terre plutôt qu'en souterrain dans l'axe des canalisations. Fait remonter les canalisations à la surface dans un cabinet hors terre chauffé (2.2m haut x 3m de large) qui inclut un compartiment mécanique et un compartiment électrique	Supprime l'espace clos. Gain de temps, de ressources (1 seule personne suffisante). Facilite le travail (accessibilité des équipements avec peu de contraintes de posture). Coûts moindres qu'une chambre traditionnelle	T2	G6
4	P2	M4	PD2	6	AE	Chambre de régulation de pression prévue pour occupation	Modification d'une chambre de régulation de pression pour une occupation régulière avec un accès par escalier, une ventilation mécanique et un éclairage permanent	Élimine la notion d'entrée en espace clos par la gestion des risques. Gain de temps, de ressources (1 seule personne suffisante). Facilite le travail (accessibilité des équipements)	T4	G1
5	P2	M4	PD2	8	AE	Palier intermédiaire du poste de pompage prévu pour occupation	Modification du palier intermédiaire du poste de pompage pour permettre une occupation régulière avec un accès par escalier dans un bâtiment adjacent, une ventilation mécanique et un éclairage permanent. Il s'agit d'une solution intermédiaire par rapport à un puits sec complet avec pompe en dehors du puits	Permet que le palier intermédiaire, où la majorité des interventions se font, ne soit plus un espace clos. Solution beaucoup moins dispendieuse qu'un puits sec	T4	G1
6	P3	M1	PD1	1	VI	Caméra 360° pour l'inspection	Utilisation d'une caméra 360° depuis l'extérieur de l'espace clos pour l'inspection (photo). « On ouvre, on teste les gaz, on passe la caméra et c'est fini ».	Élimine le besoin d'entrer pour cette tâche. Gain de temps, de déplacement et d'analyse. Qualité d'image exceptionnelle. Permet de mieux planifier les interventions qui nécessitent qu'on entre (p. ex. : désencombrement, déblocage, mandrinage).	T2	G0
7	P3	M7	PD1	16	AE	Pompes hydrauliques à l'extérieur du puits	Repositionnement des pompes hydrauliques de la presse à l'extérieur (initialement placées dans le puits d'accès sous la presse)	Élimine les entrées en espace clos pour les interventions sur les pompes hydrauliques. Réduit les risques lors des entrées dans le puits d'accès	T11	G0
8	P3	M7	PD1	8	IM	Système pour sortir les pompes submersibles du poste de pompage	Sortie des pompes immergées en restant à l'extérieur avec un palan électrique, des barres guide fixées dans le poste de pompage jusqu'en haut (et non jusqu'au palier intermédiaire) et une trappe au palier intermédiaire. Le câble électrique et de contrôle suivent et la pompe est posée sur le coude de décharge au fond du poste sans fixation	Permet de sortir les pompes à l'extérieur sans entrée et avec moins d'effort pour l'inspection annuelle. Élimine une bonne partie du temps d'intervention dans le poste pour cette intervention. Solution technique assez répandue pour les postes de pompage	T2	G0
9	P4	M1	PD1	6	VI	Livraison ouvrage filmée	À la livraison d'un ouvrage, utilisation d'une caméra pour filmer l'entrée en direct avec l'entrepreneur. Interactions possibles avec ceux qui ne sont pas sur place	Diminue le nombre de personnes qui entre (p. ex. 2 à la place de 8), diminue l'exposition globale aux risques. Offre plus de flexibilité pour la logistique de la visite. Qualité des images suffisantes pour les besoins d'inspection à la livraison	T8	G0
10	P4	M1	PD1	8	IM	Flotte de niveau d'eau amovible	Accès aux câbles des flottes de niveau d'eau en restant à l'extérieur du poste de pompage afin de pouvoir les sortir pour nettoyage et inspection périodique. Présence d'anneaux fixés au mur pour guider le câble	Élimine le besoin d'entrer pour cette tâche. Solution technique assez répandue pour les postes de pompage	T0	G0

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

Sol_ID	Principe_ID	Measure_ID	Design_ID	EC_ID	Int_ID	Sol_Norm	Sol_Desc	Sol_Av	Tech_ID	Org_ID
11	P4	M1	PD1	8	IM	Sonde de niveau d'eau non immergée	Utiliser un système de sondes de niveau d'eau plutôt que des flottes dans le poste de pompage afin de ne pas immerger le système	Élimine les interventions pour le nettoyage des sondes. Toutefois, considérées comme moins fiables que les flottes, elles sont en général associées des flottes (système critique du poste de pompage). Cela diminue l'efficacité de cette solution par rapport aux entrées	T8	G0
12	P4	M4	PD11	8	IM	Fond du puits qui favorise l'absence d'accumulations	Prévoir une conception qui favorise l'absence d'accumulations au fond du poste de pompage : plancher en pente, angles arrondis, pas de zone morte lors de la succion de la pompe	Si pas d'accumulation au fond du poste, il y a moins de blocage de pompe et donc moins d'intervention dans le poste	T0	G0
13	P4	M6	PD1	1	IE	Bornes de raccordement à la base des lampadaires	Bornes de raccordement à la base des lampadaires pour l'internet et l'électricité basse tension. Cela ne supprime pas de puits d'accès électrique, mais donne des accès localisés à la basse tension et aux télécoms	Supprime certaines entrées dans des puits d'accès électrique en lien avec les télécoms et l'alimentation des lampadaires avec des points d'accès localisés. Faisable lors du développement de nouveaux quartiers, car nécessite une architecture du réseau un peu différente	T1	G0
14	P4	M6	PD1	1	RO	Puits d'accès électrique préfabriqué	Préconstruction de la structure en béton des puits d'accès pour limiter des entrées en espace clos lors de la construction	Limite le temps d'entrée en espace clos lors de la construction	T2	G0
15	P4	M6	PD1	6	AE	Électrique/électronique à l'extérieur de la chambre de régulation de pression	Positionnement de la partie électrique/électronique de la chambre de régulation de pression dans une armoire à l'extérieur sur la voirie	Permet aux électriciens et autres personnels d'intervenir sans entrer en espace clos et seul. Gain en SST et de productivité. Protège les installations électriques du risque d'immersion dans l'eau	T4	G1
16	P4	M6	PD11	8	AE	Séparation des réseaux pluviale et sanitaire	Réduction du volume d'eaux usées à pomper et à traiter en séparant le réseau pluvial et sanitaire	Permet d'avoir plus de contrôle sur le débit du réseau d'assainissement (débit constant) et de moins solliciter les équipements. Diminue la fréquence des entrées en espace clos. Eaux usées plus denses qui nécessitent de faire quelques changements (p. ex. : pompes, pentes)	T11	G4
17	P4	M8	PD1	7	PR	Mesures depuis l'extérieur du poste	Relevés permettant de valider les plans/cartes/données dans les regards d'égout (p. ex. : radier, grosseur canalisation) faits sans entrer à l'aide d'outil sur mesure	Évite une entrée. Efficace et sécuritaire.	T2	G0
18	P4	M10	PD13	1	RO	Fibre de verre	Remplacement de l'acier par la fibre de verre dans l'armature du puits d'accès et pour les cornières qui supportent les câbles	Réduit potentiellement le nombre d'entrées en réduisant les dégradations dues à la corrosion dans le puits d'accès à cause de la présence d'eau en souterrain	T0	G0
19	P4	M11	PD11	8	IM	Dégrillage en amont du poste de pompage	Ajout d'un panier dégrilleur, que l'on peut sortir sans entrer dans le poste de pompage, et sensibilisation des citoyens sur l'importance de ne pas jeter n'importe quoi avec les eaux usées (p. ex. : lingette, cheveux).	Réduit les interventions de déblocage des pompes (<i>impulseur</i>) qui peuvent être des tâches assez longues et complexes	T12	G6
20	P4	M13	PD1	8	IM	Surveillance des pompes immergées	Instrumentation et surveillance des pompes en utilisant le câble de contrôle pour faire remonter des informations comme la température, les fuites, les vibrations	Permet d'intervenir de manière plus ciblée, d'espacer les interventions au besoin (p. ex. vibrations pour intervention sur l'assise ou les roulements)	T7	G0
21	P5	M2	PD1	1	AE	Ajout d'une deuxième ouverture aux puits d'accès électriques	Ajout d'un puits de ventilation/pompage de 30 cm (12 po) de diamètre pour libérer de la place à l'entrée principale du puits d'accès électrique. Ouverture conique qui s'agrandit vers l'intérieur pour avoir plus de jeux qu'une ouverture cylindrique	Réserve l'entrée principale pour l'entrée. Améliore l'accès, la gestion du risque de chute le sauvetage.	T2	G0
22	P5	M4	PD1	8	AE	Palier intermédiaire dans le poste de pompage	Ajout d'un palier intermédiaire au poste de pompage pour un accès aménagé à la mécanique (p. ex. : clapet antiretour, vanne pour chaque pompe, purgeur d'air, manomètres, sonde de niveau). Trappes intégrées au palier pour l'accès au fond du puits	Facilite les interventions (diminue les risques) qui ne nécessitent pas de descendre au fond. Permet des interventions avec écoulement libre dans le fond du puits. Solution assez répandue pour les postes de pompage	T0	G0

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

Sol_ID	Principe_ID	Measure_ID	Design_ID	EC_ID	Int_ID	Sol_Nom	Sol_Desc	Sol_Av	Tech_ID	Org_ID
23	P5	M5	PD2	1	AE	Socle permanent pour potence	Intégration d'un socle permanent à l'extérieur du puits pour l'installation de la potence	Améliore l'accès, la gestion du risque de chute et le sauvetage. Limite l'improvisation	T0	G0
24	P5	M5	PD2	30	AE	Ancrage permanent pour puits d'accès, poste de pompage	Installation de points d'ancrage permanents dans les infrastructures pour sécuriser les interventions	Améliore l'accès, la gestion du risque de chute et le sauvetage. Limite l'improvisation	T0	G6
25	P5	M5	PD2	8	AE	Trappe d'accès de grandes dimensions	Intégration de trappe d'accès de grandes dimensions pour la chambre de régulation de pression. Placée hors voirie	Améliore l'accès de manière générale	T4	G0
26	P5	M5	PD2	6	AE	Trappe d'accès de grandes dimensions	Intégration de trappe d'accès de grandes dimensions pour la chambre de régulation de pression. Placée hors voirie	Améliore l'accès de manière générale	T4	G0
27	P5	M5	PD2	6	AE	Garde-corps permanents. Grille sous la trappe d'accès	Intégration de garde-corps permanents autour de l'entrée de la chambre de régulation de pression. Si pas possible, ajout d'une grille ou équivalent sous la trappe principale pour que les travailleurs ne soient pas exposés au risque de chute à l'ouverture de la trappe principale	Assure la sécurité des travailleurs lorsque la trappe principale est enlevée	T4	G0
28	P5	M5	PD2	8	AE	Échelle droite	Intégration d'une échelle droite tout au long du puits (plutôt que décalée aux paliers). Palier de repos amovible possible à certaines hauteurs	Le fait de ne pas décaler des échelles au palier intermédiaire permet de faire du sauvetage vertical sans entrée. Facilite aussi l'utilisation d'une ligne de vie.	T7	G0
29	P5	M8	PD2	1	AE	Protection chute objets dans le puits d'accès électriques	Utilisation d'un système ajustable (parapluie à l'envers) sans entrée pour bloquer la chute de blocs de ciment par la cheminée au fur et à mesure des travaux de destruction Utilisation d'un anneau autour de l'entrée pour empêcher la chute de résidus dans le puits, lorsqu'ouvert	Diminue le risque de chute d'objets. Diminue le risque d'explosion si un bloc tombe sur un câble alimenté lors d'un brisé-reconstruire.	T8	G0
30	P5	M10	PD5	1	AE	Ligne de vie en kevlar pour les puits d'accès électriques	Utiliser un câble de vie en fibre de Kevlar pour des questions de risque électrique	Réduit les risques électriques lorsqu'on est attaché à la ligne de vie dans le puits d'accès électrique. Favoriser le fait de rester attaché	T1	G0
31	P5	M10	PD2	1	AE	Peinture des murs en blanc	Peinturer en blanc les murs à l'intérieur du puits d'accès	Améliore la visibilité globale. Facile à mettre en œuvre	T0	G0
32	P5	M12	PD1	1	AE	Panier de récupération des seringues souillées	Ajout d'un panier sous l'ouverture du puits d'accès pour éviter les déchets à l'intérieur et notamment les seringues	Réduit le risque de piqûres avec des seringues (jusqu'à 150 seringues par an dans certains puits). Solution facile à mettre en place	T0	G0
33	P5	M12	PD5	8	AE	Points de coupure pour le poste de pompage	Intégration de points de coupure cadencés à la conception du poste de pompage	Permet des interventions sans écoulement libre et sécurisées. Limite l'improvisation et les interventions avec présence d'énergie	T0	G0
34	P5	M17	PD2	8	IM	Redondance des pompes dans le poste de pompage	Installation de deux pompes dans le poste de pompage	Offre plus de flexibilité dans la planification en cas de bris d'une pompe (moment favorable, moins d'urgence). Service continu en cas de bris	T0	G0

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

5.2.2 Réservoir

Les exemples d'espaces clos inclus dans la catégorie « Réservoir » peuvent être répartis en 3 principaux sous-groupes : les réservoirs fixes de procédé avec des produits en transit (p. ex. : liqueur, noir, pâtes) (EC_ID : 5, 14-15), les réservoirs fixes de stockage de produits liquides (p. ex. : liquide alcalin, pétrole) ou solides (silo, trémie) (EC_ID : 22-23, 26-28) et les réservoirs mobiles de stockage (p. ex. : boule de bétonnière, camion-citerne, wagon-citerne) (EC_ID : 11-13). Les 37 solutions évoquées sont notamment (tableau 18) :

- Réservoir de procédé avec produits en transit concernant la problématique des résidus et du nettoyage (EC_ID : 5, 14-15) : diminuer le besoin d'entrer avec (i) le fond du réservoir [n° 45] et un revêtement [n° 51] qui favorise l'écoulement, (ii) un système avec jets à 360° et de l'eau tiède pour améliorer la dissolution lors du nettoyage depuis l'extérieur [n° 48-49], (iii) un brassage avec des gaz [n° 53], un filtrage en amont par centrifugation [n° 54], un agitateur au fond réservoir [n° 55] ou encore une amélioration du procédé en amont [n° 56] pour réduire la quantité de résidus dans le réservoir.
- Réservoir fixe de stockage (EC_ID : 22-23, 26-28) : diminuer le besoin d'entrer avec la mesure des parois par ultrason à l'extérieur [n° 36], l'utilisation de drone d'inspection ATEX [n° 37], le repositionnement des capteurs de pression à l'extérieur plutôt que sur la paroi [n° 38], le repositionnement du tamis pour la recirculation du sable à l'extérieur du silo [n° 39] ou encore une structure plus durable en fibre de verre [n° 51] ; améliorer l'accès avec une ouverture en bas du réservoir (déclassement) [n° 59, 61-63] et des ouvertures/trappes additionnelles pour l'inspection [n° 43].
- Réservoir mobile de stockage avec notamment l'exemple de la bétonnière (EC_ID : 11-13) :
 - o diminuer le besoin d'entrer en ayant moins de béton séché dans la boule grâce au design des palettes [n° 47] (figure 11), la simplification du rinçage quotidien [n° 57] et des préparations de béton moins collantes lorsque possible [n° 58] ;
 - o améliorer l'accès, l'intervention et l'évacuation avec :
 - une passerelle pour atteindre l'entrée [n° 64] et une protection sur le pourtour de l'entrée horizontale [n° 65],
 - du sable au fond de la boule pour la stabilité [n° 68] et l'immobilisation de la bétonnière et de la boule [n° 69],
 - une potence transportable par chariot élévateur (wagons-citernes) [n° 66].

Figure 11. Vue intérieure d'une boule de bétonnière, palette intégrée à la structure pour brasser et livrer le béton (EC_ID : 12; solution n° 47).

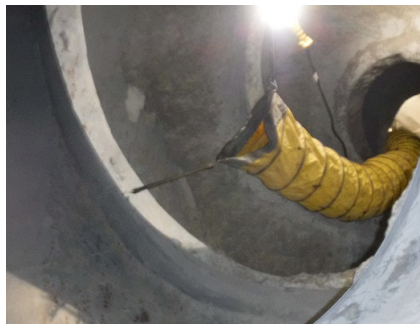


Tableau 18. Solutions de la base de connaissances associées au type d'espace clos « Réservoir »

Sol_ID	Principe_ID	Mesure_ID	Design_ID	EC_ID	Int_ID	Sol_Nom	Sol_Desc	Sol_AV	Tech_ID	Org_ID
35	P1	M5	PD3	5	AE	Suppression de l'antichambre	Suppression de l'antichambre (espace clos) pour l'accès à la porte d'accès du digesteur (en sous-sol) en créant un accès régulier à la porte (p. ex. escalier)	Élimine un espace clos inutile dû à un choix de conception pour l'accès au digesteur	T0	G0
36	P3	M1	PD1	23	II	Mesure par ultrason	Mesure d'épaisseur de parois de réservoirs depuis l'extérieur par ultrason	Évite de devoir entrer annuellement pour cette inspection en plaçant un récepteur à l'intérieur	T10	G0
37	P3	M1	PD1	22	VI	Drone d'inspection ATEX	Utilisation d'un drone pour atmosphère explosive pour l'inspection visuelle d'intégrité d'infrastructure (p. ex. toit réservoir pétrolier)	Évite une entrée en espace clos. Rentable dans le cas d'inspection visuelle de grosses infrastructures	T12	G2
38	P3	M7	PD1	26	IM	Repositionnement des capteurs de pression	Repositionnement de capteur de pression à l'extérieur du réservoir (avec tuyau, valve et drain) plutôt que coller sur sa structure	Évite une entrée relative à la maintenance du capteur qui peut se faire facilement grâce à la valve et au drain. Modification rentable	T0	
39	P3	M7	PD12	28	UN	Filtrage du sable à l'extérieur	Installation d'un parapluie/tamis sur le circuit du sable fermé en dehors du silo. Élimine les déblocages dans le silo de sable. Tamis présenté à l'opérateur pour nettoyage par le robot-manipulateur de pièces à une fréquence prédéterminée	Élimine le besoin d'entrée pour cette tâche en déplaçant le point critique à l'extérieur de l'espace clos. Utilisation du robot manipulateur de pièce pour automatiser le nettoyage. Bon retour sur investissement	T0	
40	P4	M1	PD1	15	VI	Caméra 360° pour l'inspection	Utilisation d'une caméra depuis l'extérieur de l'espace clos pour un 1 ^{er} diagnostic qualitatif	Élimine le besoin d'entrer pour cette tâche. Gain de temps. Qualité d'image. Permet de mieux planifier les interventions qui nécessitent qu'on entre	T5	G1
41	P4	M1	PD1	15	VI	Caméra traditionnelle pour l'inspection			T2	G2
42	P4	M1	PD1	12	VI	Caméra traditionnelle pour l'inspection			T5	G0
43	P4	M2	PD1	27	UN	Ouvertures/trappes additionnelles pour inspection	Ajout de trappes ou d'ouvertures bien positionnées pour faciliter certaines tâches de l'extérieur : déblocage, mesures de gaz, inspection visuelle	Élimine le besoin d'entrée. Ne nécessite pas l'application d'une procédure d'entrée en espace clos complète, simplement un contrôle des énergies	T2	G1
44	P4	M2	PD1	11	RW	Ouvertures pour faciliter la réparation de citerne	Découpe d'une ouverture dans la paroi de la citerne d'eau sur le côté au plus près de la réparation de la chicane (là où il y a des fuites)	Élimine le besoin d'entrée en permettant de faire la réparation depuis l'extérieur (soudage). Réduit les risques d'exposition aux fumées de soudage	T12	G0
45	P4	M4	PD11	14	MR	Fond du réservoir qui favorise l'écoulement	Conception d'un plancher en pente plutôt que plat pour favoriser l'écoulement et donc le nettoyage du réservoir de produit toxique	Facilite le nettoyage. Gain de temps puisque moins de résidus. Facile à mettre en œuvre	T0	G1
46	P4	M7	PD8	5	AE	Tuyauterie permanente jusqu'à l'extérieur	Ajout d'une tuyauterie permanente jusqu'à l'extérieur du digesteur pour raccorder l'azote gazeux lors de l'inertage sans entrée dans l'antichambre (espace clos)	Élimine le besoin d'entrée dans l'antichambre (espace clos) pour l'étape d'inertage en préparation de l'ouverture du digesteur. Solution relativement simple. Gain SST important.	T0	G0
47	P4	M7	PD7	12	IM	Design des palettes (bétonnière)	Travail sur le design des palettes (en T) pour limiter l'accumulation de béton et le risque de chute de béton lors du passage du moule	Limite l'accumulation de béton et réduit le temps d'entrer. Réduit les risques de chute de gros morceau de béton	T0	G4
48	P4	M8	PD1	14	PW	Jet 360° à l'eau tiède pour nettoyage	Nettoyage à l'eau depuis l'extérieur le plus longtemps possible avant d'entrer. Utilisation de dispositif pour des jets à 360° (type Gamajet) et avec de l'eau tiède pour favoriser la dilution des résidus sous forme de boue ou de pâte séchée	Diminue le temps d'entrée dans l'espace clos, car moins de résidus restants. Gain de temps et en utilisation de ressources	T7	G0
49	P4	M8	PD1	15	PW	Nettoyage			T5	G0
50	P4	M8	PD12	12	MR	Produit pour aider à dissoudre le béton	Utilisation d'un produit industriel qui aide à dissoudre dans la boue de la bétonnière	Diminue le temps d'entrée en préparant le nettoyage	T10	G1
51	P4	M10	PD13	23	RO	Fibre de verre	Remplacement des réservoirs en métal par ceux en fibre de verre lorsque possible	Nécessite moins d'intervention d'entretien, car potentiellement plus durable	T9	G0
52	P4	M10	PD11	15	MR	Revêtement des parois des cuiviers	Utilisation de céramique dans les cuiviers pour limiter l'adhésion de la pâte aux parois	Diminue le besoin de nettoyer les parois en limitant la formation de résidu (pâte séchée)	T0	G0

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

Sol_ID	Principe_ID	Measure_ID	Design_ID	EC_ID	Int_ID	Sol_Nom	Sol_Desc	Sol_Av	Tech_ID	Org_ID
53	P4	M11	PD11	5	IM	Brassage des boues avec des biogaz	Recirculation des biogaz sous forme de bulles pour mélanger les boues (plutôt qu'un mélangeur mécanique qui nécessite plus d'entretien et donc des entrées dans l'espace clos)	Favorise une méthode qui nécessite moins d'entretien qu'un agitateur mécanique et donc moins d'entrées. Réutilise un produit présent dans le procédé	T0	G0
54	P4	M11	PD1	14	MR	Filtrage en amont par centrifugation	Filtrage des résidus en amont du réservoir par centrifugation	Limite l'accumulation de résidus dans le réservoir et donc la fréquence de nettoyage avec entrée	T10	G1
55	P4	M11	PD1	14	MR	Agitateur au fond réservoir	Ajout d'un agitateur dans le fond du réservoir pour limiter les dépôts	Limite l'accumulation de dépôt au fond du réservoir et donc la fréquence de nettoyage avec entrée	T10	G1
56	P4	M11	PD1	14	MR	Amélioration du procédé en amont	Remplacement de l'équipement en amont (diffuseur) afin d'avoir un procédé plus efficace et moins de résidus dans le produit en transit	Limite les résidus dans le système et donc la fréquence de nettoyage avec entrée	T11	G1
57	P4	M16	PD1	12	MR	Rinçage quotidien	Mise en place d'infrastructures pour un nettoyage quotidien de la boule de la bétonnière (eau et sable) pour limiter l'accumulation de béton dans la boule	Permet de garder un volume minimal satisfaisant dans la boule plus longtemps diminuant la fréquence d'entrée pour casser le moule de béton	T0	G6
58	P4	M16	PD12	12	MR	Préparation béton moins collante (bétonnière)	Travail sur la qualité et la préparation du béton (moins collant) pour limiter l'accumulation de béton dans la boule après livraisons	Permet de garder un volume minimal satisfaisant dans la boule plus longtemps diminuant la fréquence d'entrée pour casser le moule de béton	T1	G6
59	P5	M2	PD8	26	AE	Ouverture en bas du réservoir	Ajout d'ouvertures en bas du réservoir, même si l'entrée se fait en haut	Facilite la ventilation. Peut faciliter le sauvetage. S'il y a un problème, on continue de descendre la victime et on la sort par en bas (p. ex. : dépoussiéreur, silo)	T0	G0
60	P5	M2	PD8	5	AE	Trappes additionnelles sur le toit	Intégration de deux trappes de grandes dimensions sur le toit des digesteurs pour favoriser la ventilation mécanique	Facilite la ventilation après l'inertage (plus on a d'ouvertures, plus on peut ventiler facilement surtout les gros réservoirs).	T0	G0
61	P5	M5	PD9	15	IM	Entrée en bas du réservoir (déclassement)	Ajout d'une porte d'accès en bas réservoir (2 m x 1,2 m) et utilisation de l'ouverture sur le toit du réservoir pour faciliter la ventilation	Facilite la ventilation, les entrées, la gestion des chutes et le sauvetage. Si l'espace clos est déclassé, c'est rentable juste par les économies relatives à l'élimination des contraintes administratives liées aux espaces clos (p. ex. : formation, permis, EPI, surveillant, équipe de sauvetage)	T2	G0
62	P5	M5	PD2	23	AE		Découpe d'une grande ouverture temporaire dans la structure du réservoir pour permettre l'entrée de la machinerie (déclassement). Remise en place par soudage après les travaux		T6	G8
63	P5	M5	PD2	22	RO				T3	G0
64	P5	M5	PD2	12	AE	Passerelle pour l'accès à l'entrée	Ajout d'un escalier « 3 marches » avec une passerelle pour faciliter l'accès à l'entrée de la boule de la bétonnière	Améliore l'accès et l'évacuation	T7	G5
65	P5	M5	PD7	12	AE	Protection sur le pourtour de l'entrée horizontale	Ajout d'un dispositif de protection sur le pourtour de l'accès (p. ex. tuyau d'eau coupé longitudinalement)	Limite les blessures potentielles de coupure. Facilite la manipulation de la planche de sauvetage (sked). Coût faible	T0	G0
66	P5	M8	PD2	13	AE	Potence transportable par chariot élévateur	Utilisation d'une structure transportable par chariot élévateur pour avoir un point d'ancrage au-dessus de l'entrée des citernes mobiles	Facilite toute la logistique du sauvetage sur des espaces clos mobiles	T6	G0
67	P5	M8	PD2	13	AE	Plateforme sur mesure pour intérieur de citerne	Utilisation d'une plateforme que l'on peut déployer à l'intérieur de la citerne (fond incurvé) pour atteindre le haut des parois	Facilite le travail en hauteur dans la citerne. Diminue le risque de chute en hauteur	T2	G0
68	P5	M8	PD2	12	AE	Sable au fond de la boule de la bétonnière	Ajout de sable au fond de la boule de la bétonnière pour stabiliser les appuis	Stabilise les appuis du travailleur et diminue le risque de chute de plain-pied	T0	G5
69	P5	M12	PD5	12	AE	Immobilisation de la bétonnière et de la boule	Intégration d'un coupe-batterie cadencé sur la bétonnière et d'un mécanisme pour bloquer la rotation de la boule	Facilite le contrôle des énergies de l'équipement mobile associé (bétonnière) avant d'entrer dans l'espace clos (boule)	T0	G5
70	P5	M16	PD5	13	AE	Dispositif de purge pour la citerne	Intégration de dispositif à la structure pour maximiser la purge à l'air et à l'eau avant l'ouverture	Permet de faciliter la purge et de diminuer les risques liés au contenu de la citerne sans ouvrir l'espace clos	T7	G0
71	P5	M16	PD9	12	IM	Remplacement palettes (boule bétonnière)	Changement des palettes de la boule de bétonnière avant qu'elles ne soient trop usées et coupantes	Réduit le risque de coupure lors de l'opération de cassage du moule de béton en utilisant une maintenance préventive	T0	G3

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

5.2.3 Bassin

Les exemples d'espaces clos inclus dans la catégorie « bassins » peuvent être répartis en 3 sous-groupes : les bassins de décantation (p. ex. traitement des eaux) (EC_ID : 2-4), les bassins pour le traitement chimique de pièces (EC_ID : 24-25) et les bennes ouvertes mobiles de type wagon-gondole (EC_ID : 9-10). Les 24 solutions évoquées consistent principalement à éviter les entrées pour du nettoyage ou de l'inspection (tableau 19) :

- Bassin de décantation (EC_ID : 2-4) : supprimer l'espace clos en le remplaçant par du filtrage en continu [n° 72] ; diminuer le besoin d'entrée par l'utilisation de caméra 360° ou de sous-marin [n° 73-74, 76], un mécanisme pour sortir les pompes sans entrer [n° 79], la réduction des déchets en amont (p. ex. dégrilleur) [n° 82], la captation des gaz corrosifs [n° 85] et la réduction des accumulations des filasses par la réduction des obstacles (p. ex. vis sans fin) [n° 83] ; améliorer l'accès et l'intervention avec un trottoir au fond du bassin [n° 88-89] ou encore une redondance des pompes pour mieux planifier l'intervention [n° 93].
- Bassin de traitement chimique (EC_ID : 24-25) : diminuer le besoin d'entrer par l'utilisation de drone [n° 75], un nettoyage en restant à l'extérieur avec une perche vacuum ou l'utilisation de pince [n° 80-81], un nettoyage en utilisant le procédé lui-même (p. ex. : grattoir mieux conçu, buse, lavage) [n° 78, 84, 87] ou finalement l'utilisation de matériaux pour les parois plus résistants aux produits chimiques [n° 86].
- Benne ouverte mobile (EC_ID : 9-10) : supprimer l'entrée avec une station de nettoyage automatisée [n° 77] ; améliorer l'accès avec l'ajout d'escalier mobile [n° 90].

On note aussi l'installation de points d'ancrage, de poutre et palan au-dessus du bassin pour la manutention, le risque de chute et le sauvetage.

Tableau 19. Solutions de la base de connaissances associées au type d'espace clos « Bassin »

Sol_ID	Principe_ID	Measure_ID	Design_ID	EC_ID	Int_ID	Sol_Nom	Sol_Desc	Sol_Av	Tech_ID	Org_ID
72	P1	M6	PD1	3	AE	Système de filtration de l'eau en continu	Remplacement de trois bassins de filtration des eaux usées par un système de filtration de l'eau en continu	Élimine l'espace clos	T11	G0
73	P3	M1	PD1	4	VI	Caméra 360° pour l'inspection	Utilisation d'une caméra 360° depuis l'extérieur de l'espace clos pour l'inspection (photo)	Élimine le besoin d'entrer pour cette tâche. Gain de temps, de déplacement. Qualité d'image exceptionnelle	T0	G0
74	P3	M1	PD1	2	VI				T0	G0
75	P3	M11	PD1	25	VI	Drone d'inspection	Drone avec caméra pour la surveillance des bassins ouverts	Élimine le besoin d'entrée. Améliore le suivi	T0	G1
76	P3	M1	PD1	2	VI	Sous-marin télécommandé	Utilisation d'un sous-marin télécommandé (avec fil) muni d'une caméra pour l'inspection dans bassin d'eau claire	Inspection en arrêt simple (pas de cadencement). Reste rentable même en sous-traitance puisque pas d'entrée et d'arrêt complet.	T0	G2
77	P3	M3	PD1	9	PW	Station de nettoyage automatisé	Station automatisée avec brosses pour nettoyer les wagons	Élimine le besoin d'entrée	T11	G4
78	P3	M3	PD1	25	PW	Nettoyage procédé automatisé	Automatisation du nettoyage des bassins prévu dans le procédé	Élimine l'entrée une fois par semaine	T11	G0
79	P3	M7	PD1	2	IM	Système pour sortir les pompes submersibles du bassin	Ajout d'un système de rail lors de la réfection des bassins pour pouvoir sortir les pompes sans entrer dans le bassin	Supprime une entrée annuelle. La seule raison pour entrer serait un problème sur l'imperméabilité du bassin	T2	G0
80	P4	M8	PD1	25	PW	Perche vacuum de l'extérieur	Perche vacuum utilisée de l'extérieur pour aspirer les résidus	Pas d'entrée en espace clos, limite l'exposition au HF	T5	G0
81	P4	M8	PD1	25	MR	Perche avec pince depuis l'extérieur	Utilisation d'une perche munie d'une pince pour attraper les pièces qui se sont décrochées lors du traitement dans le bassin	Supprime les entrées pour récupérer les pièces traitées tombées	T8	G0
82	P4	M11	PD12	4	AE	Dégrillage en amont	Optimisation la taille des dégrilleurs en amont (6 mm) et de la fréquence de nettoyage pour optimiser le colmatage et ainsi limiter l'introduction de résidus (filasse) dans le procédé	Diminue le nombre d'interventions de nettoyage ou de déblocage dans les bassins en aval	T8	G1
83	P4	M11	PD1	4	PW	Vis sans fin au fond du bassin	Vis sans fin au fond du bassin plutôt qu'un pont roulant circulant dans le bassin pour diminuer l'accumulation de filasses. Rampes d'aération profilées et en nombre minimal	Diminue la durée des interventions d'entretien (moins d'accumulation de filasses). Nettoyage possible en partie depuis le plancher	T0	G0
84	P4	M11	PD1	24	MR	Grattoir	Optimisation du système pour gratter les parois des cuves pour empêcher la formation d'une épaisseur de pâtes sur les parois	Diminue le besoin d'entrée pour nettoyer les parois	T8	G0
85	P4	M11	PD8	4	AE	Aspiration des aérosols à la source	Recouvrement des bassins, confinement de certaines parties du procédé, aspiration et traitement de l'air vicié	Limite la dégradation des infrastructures et donc les interventions d'entretien. Récupération de chaleur dans l'air vicié. Rentable	T0	G0
86	P4	M10	PD13	25	RO	Matériaux plus résistants aux produits chimiques utilisés	Remplacement de matériaux pour améliorer leur durabilité et leur résistance aux produits chimiques utilisés (p. ex. : type de plastique pour les buses ; alliage de nickel et de cuivre)	Diminue la dégradation des matériaux et donc le besoin de réparer et des interventions à risque	T10	G0
87	P4	M11	PD11	25	PW	Buse d'air pour le brassage des résidus	Utilisation de buses d'air au fond du bassin pour brasser les résidus et limiter l'accumulation de débris	Limite l'accumulation de débris et donc le besoin d'entrer pour nettoyer	T0	G0
88	P5	M4	PD2	4	PW	Trottoir au fond du bassin (dessableur)	Intégration d'un petit trottoir au fond du bassin plutôt qu'un fond strictement en V pour faciliter les déplacements	Diminue le risque de chute de plain-pied. Facilite l'installation des protecteurs au fond du bassin. Ne nuit pas à l'évacuation du sable	T0	G0
89	P5	M4	PD2	4	AE	Accessibilité des rampes d'aération (dessableur)	Positionnement des rampes d'aération pour qu'elles soient accessibles depuis le fond du bassin sans accessoire	Facilite l'enlèvement des filasses. Limite le risque de chute et les postures exigeantes	T0	G0
90	P5	M5	PD2	9	PW	Ajout escalier amovible	Ajout d'un escalier amovible manié avec une pelle mécanique	Améliore l'accès dans le wagon. Possibilité de déclassement.	T9	G0
91	P5	M5	PD2	10	PW	Points d'ancrage et socles de	Intégration de points d'ancrage permanents testés annuellement et socles pour potence	Améliore l'accès et l'évacuation. Diminue le risque de chute. Évite l'improvisation	T0	G0
92	P5	M5	PD2	25	AE	potence permanents			T0	G0
93	P5	M5	PD2	4	AE	Trappes d'accès en 2 étapes	Intégration d'une trappe d'accès en 2 étapes et de socles permanents : 1. Retrait de la 1 ^{re} trappe lourde avec la potence, 2. Mise en place des garde-corps, 3. Retrait de la 2 ^e trappe légère	Assure la sécurité des travailleurs le temps d'enlever la trappe en acier et d'installer les garde-corps. Permet le retrait de la trappe lourde avec la potence. Facilite l'installation des garde-corps	T0	G0
94	P5	M11	PD10	4	AE	Poutre et un palan pour manutention	Intégration d'une poutre et d'un palan au-dessus du dessableur pour manutention des objets	Facilite la manipulation des charges dans le dessableur (p. ex. vis sans vis au fond du bassin)	T0	G0
95	P5	M17	PD2	4	AE	Redondance des installations	Procédé avec deux dessableurs et deux digesteurs en parallèle	Permet l'arrêt total tout en continuant de fournir le service aux citoyens. Flexibilité. Pas d'écoulement libre	T0	G0

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

5.2.4 Cheminée

Les espaces clos inclus dans la catégorie « cheminées » sont une cheminée de fournaise industrielle (EC_ID : 20) et une colonne de séparation sur une raffinerie (EC_ID : 21). Le travail d'inspection et de nettoyage en hauteur (30 m) et la chute de débris en bas de la cheminée sont les principaux risques qui ont été évoqués. Les solutions proposées (tableau 20) sont basées sur le fait de ne pas entrer dans la cheminée en utilisant un drone [n° 96] ou encore de privilégier une entrée sécuritaire par le haut (figure 12) [n° 97-99].

Figure 12. Base en aluminium emmanchée dans l'ouverture qui sert de support à une échelle rigide installée par section depuis le haut (EC_ID : 20; solution n° 97).



5.2.5 Intérieur d'un équipement industriel

Les espaces clos inclus dans la catégorie « intérieur d'un équipement industriel » sont principalement des chaudières à vapeur à tubes d'eau (EC_ID : 18) et des fournaies industrielles (EC_ID : 19). La difficulté d'accès et l'espace restreint sont les principaux problèmes qui ont été évoqués. Les 13 solutions évoquées (tableau 21) porte donc le fait de diminuer le besoin d'entrer avec des inspections par caméra [n° 100], des ouvertures pour inspecter de l'extérieur (figure 13) [n° 101 et 102] et l'amélioration de pièces critiques [n° 104]. Des solutions pour faciliter les mouvements d'entrée ont aussi été évoquées comme l'utilisation de plateforme pour être à niveau ou l'ajout de poignée soudée [n° 106-110]. Le cas du précipitateur électrostatique (EC_ID : 17) a aussi été évoqué avec l'utilisation de charges explosives pour décoller les résidus sans entrer [n° 103].

Tableau 20. Solutions de la base de connaissances associées au type d'espace clos « Cheminée »

Sol_ID	Principe_ID	Mesure_ID	Design_ID	EC_ID	Int_ID	Sol_Nom	Sol_Desc	Sol_Av	Tech_ID	Org_ID
96	P3	M1	PD1	20	VI	Drone d'inspection	Drone muni d'une caméra et d'un éclairage pour une inspection visuelle de la structure interne de la cheminée (environ 45 m de haut [150 pi])	Élimine l'entrée avec le risque de chute (panier attaché à une grue) et le risque de chute de débris. Image de très bonne qualité, possibilité d'agrandissement (zoom), ondes radio passent à travers le réfractaire. Permet de conclure si des réparations sont nécessaires	T2	G2 G7
97	P5	M5	PD2	21	AE	Système d'échelle temporaire rigide	Système sur mesure avec une base en aluminium que l'on emmanche dans l'ouverture (sleeve) qui permet de maintenir une échelle rigide qu'on bâtit par section de 1,5 m (5 pi)	Facilite l'exécution par rapport aux échelles de corde. Améliore l'accès, la gestion des chutes, etc.	T1	G1
98	P5	M5	PD2	21	AE	Aménagement des entrées	Avoir une aire de travail assez grande autour des entrées (p. ex. passerelle) pour les situations de sauvetage notamment	Améliore toute la logistique de l'entrée et du sauvetage	T0	G1
99	P5	M7	PD2	21	AE	Chaise manutentionnée par une potence	Plutôt que de monter un échafaudage dans une colonne de 30 m (100 pi) de haut, utilisation d'une « chaise » manutentionnée par une potence avec un ancrage permanent depuis le haut	Améliore toute la logistique de l'entrée, du travail et du sauvetage	T1	G4

Figure 13. Ouverture dans la structure de la chaudière, sans être un accès, pour permettre une inspection ou un nettoyage depuis l'extérieur (EC_ID : 18; solution n° 101).



Tableau 21. Solutions de la base de connaissances associées au type d'espace clos « Intérieur d'un équipement industriel »

Sol_ID	Principe_ID	Mesure_ID	Design_ID	EC_ID	Int_ID	Sol_Nom	Sol_Desc	Sol_Av	Tech_ID	Org_ID
100	P3	M1	PD1	18	VI	Caméras d'inspection spécialisées pour fournaise	Utilisation de caméra d'inspection ou la thermographie pour poser un diagnostic sur les tubes défectueux de la fournaise sans entrer et mieux planifier l'intervention	Simplifie l'intervention. Permet de choisir quel accès utiliser pour être au plus proche de la réparation. Savoir quelle réparation faire à l'intérieur sans entrer	T2	G2
101	P3	M2	PD1	18	PW	Ouverture pour un nettoyage depuis l'extérieur de la chaudière	Nettoyage depuis l'extérieur de la chaudière par des ouvertures prévues ou faites sur place (on ne peut pas entrer à cause des tubes, mais on peut passer un nettoyeur à pression)	Malgré la présence de tubes partout sur les parois qui empêche l'accès dans la chaudière, ces ouvertures permettent d'avoir un accès pour un nettoyage sous pression sans entrer	T0	G0
102	P3	M2	PD1	18	VI	Regards d'inspection	Utilisation de regards d'inspection (x8 de 200x100 mm avec ouverture rapide à une hauteur pour avoir une vue sur l'ensemble) pour poser un diagnostic sur les tubes défectueux de la fournaise sans entrer et mieux planifier l'intervention	Simplifie l'intervention. Permet de choisir quel accès utiliser pour être au plus proche de la réparation. Savoir quelle réparation faire à l'intérieur sans entrer	T0	G0
103	P4	M8	PD11	17	MR	Charges explosives	Utilisation de charges explosives (installée depuis l'extérieur) pour décoller les résidus des parois du précipitateur	Facilite l'intervention puisqu'il faut récupérer les résidus en bas avec un convoyeur plutôt que de souffler les résidus (visibilité nulle). Gain de temps (x2-3) et plus de flexibilité pour l'entretien	T12	G2
104	P4	M10	PD1	18	RW	Reconception de pièces critiques de la chaudière	Amélioration de la conception de pièces critiques avec des matériaux comme l'inox, le composite, le chrome. Boulonnées plutôt que soudées.	Permet un gain de productivité de la chaudière tout en diminuant le nombre d'interventions potentiel à cause de la dégradation de ces pièces	T2	G4
105	P4	M11	PD7	29	RE	Modification de la chute du convoyeur de fosse	Réduction de l'éparpillement des copeaux avec un caillebotis restreint, l'ajout d'une chute et d'un tapis en auge convexe	Réduit le besoin d'entrée à cause d'un blocage du convoyeur en concentrant les copeaux dans la bonne zone de chute	T11	G1
106	P5	M2	PD2	19	AE	Ajout de brides à la chambre de combustion	Ajout de brides pour faire passer la ventilation, les lumières, les câbles de soudage, les tuyaux d'air sous pression ailleurs que par l'entrée principale	Améliore toute la logistique de l'entrée et du sauvetage	T2	G1
107	P5	M5	PD2	19	AE	Grandes ouvertures permanentes boulonnées	Ajout de grandes ouvertures permanentes boulonnées à la fournaise plutôt que découper la paroi et casser le réfractaire à chaque fois	Améliore l'accès et la manutention (p. ex. permet d'utiliser un convoyeur pour les briques). Peut se justifier par le volume de travail (p. ex. : retubage complet, remplacement des brûleurs) et la répétition des travaux	T2	G1
108	P5	M5	PD2	19	AE	Taille minimum des entrées	Taille minimum des entrées des fournaies à 914 mm (36 po)	Améliore toute la logistique de l'entrée et du sauvetage par rapport à des entrées de 610 mm (24 po), surtout avec un harnais, un APR, etc.	T2	G1
109	P5	M5	PD2	18	AE	Design des entrées des chaudières	Positionnement par rapport au sol et forme de l'entrée de la fournaise optimisés pour faciliter les mouvements de l'entrée et les postures. La taille des ouvertures est souvent limitée à cause des contraintes de température sur cette zone (pas de tubes, donc pas de circulation d'eau)	Améliore toute la logistique de l'entrée et du sauvetage, mais rarement possible sur les chaudières	T2	G1
110	P5	M5	PD2	18	AE	Aide à l'entrée	Ajout d'une plateforme pour être au même niveau que l'entrée et pouvoir se glisser dans l'ouverture. Ajout d'une poignée au-dessus de l'entrée (soudée)	Permet d'accompagner l'entrée en étant allongé et en s'aidant avec les mains	T4	G6
111	P5	M8	PD2	18	RW	Faux plancher dans ballon de fournaise	Ajout de faux plancher dans les ballons d'eau de la fournaise pour pouvoir travailler allongé	Améliore la posture de travail dans l'espace clos qui est restreint	T0	G0
112	P5	M11	PD8	18	AE	Ventilation par le procédé	Utilisation de la ventilation du système de la chaudière pour améliorer la ventilation de l'entrée (si pas en maintenance)	Facilite la ventilation associée à l'entrée	T6	G0

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

5.3 Discussions sur la base de connaissances

5.3.1 Contenu de la base de connaissances

La plupart des solutions dans la base de connaissances ont été évoquées dans un contexte de modification de l'existant (rétrofit) (80 %). Bien que limitée, la modification de l'existant est souvent la situation la plus courante sur le terrain. Aussi, 80 % des solutions de la base de connaissances étaient déjà implantées ou sur le point de l'être contre 20 % sérieusement envisagées ou du domaine du possible. Les solutions proposées sont donc pour la plupart réalistes en milieu de travail. À ce stade-ci, il convient de mentionner que la base de connaissances, telle que présentée, ne contient pas la vingtaine de solutions qui ont été rapidement écartées par les participants lors des discussions. Ce choix a été fait pour ne pas compliquer inutilement la base de données puisque ces solutions ont été pour la plupart incluses dans la base de connaissances par l'intermédiaire des autres études de cas (p. ex. : ajouter des ouvertures, caméra d'inspection). Les principales raisons pour rejeter rapidement une solution sont un coût trop grand devant une efficacité réduite ou une incompatibilité technique.

Par ailleurs, on peut mentionner que les solutions évoquées par les experts sont couvertes dans la base de connaissances, ce qui n'est pas le cas de toutes les propositions issues des AdC. Ce constat est vrai pour les solutions en lien avec l'automatisation, la robotique et le système de commande. Par rappel, l'exercice avec les AdC faisait abstraction des contraintes réelles. Cela confirme que la robotique, l'automatisation et l'IoT ne semblent pas encore implantées à la hauteur de leur potentiel (à l'exception des drones). Les coûts, leur fiabilité et leur efficacité ont été une nouvelle fois évoqués (cf. aussi section 4.2.1).

Le tableau 22 présente la répartition des 112 solutions de la base de connaissances selon différentes catégories. Ce tableau est discuté dans les paragraphes qui suivent.

Tableau 22. Portrait général des solutions de la base de connaissances

Principe de PIPC-EC		Type de mesure		Pb conception		Type intervention		Type EC	
Principe_ID	Nb	Mesure_ID	Nb	Design_ID	Nb	Int_ID	Nb	Type	Nb
P1	5	M1	14	PD1	48	AE	50	Puits d'accès +	34
P2	2	M2	8	PD2	33	IE	1	Réservoir	37
P3	18	M3	2	PD3	1	II	1	Bassin	24
P4	42	M4	7	PD4	0	IM	13	Cheminée	4
P5	45	M5	22	PD5	4	MR	11	Int. équipement	13
		M6	8	PD6	0	PR	1		
		M7	8	PD7	3	PW	11		
		M8	12	PD8	5	RE	1		
		M9	0	PD9	2	RO	5		
		M10	7	PD10	1	RW	3		
		M11	14	PD11	8	UN	2		
		M12	3	PD12	4	VI	13		
		M13	1	PD13	3				
		M14	0						
		M15	0						
		M16	4						
		M17	2						

a) Principes de PIPC-EC et types de mesure

Le premier constat possible est que les principes P1 (éliminer l'espace clos) et P2 (déclasser par les risques), placés le plus haut dans la hiérarchie de mesures de réduction du risque, ne représentent que 6 % des solutions évoquées (7/112). Lors des discussions, il est apparu que les options concernant ces principes étaient limitées en prenant en compte le contexte réel d'autant plus que les participants avaient naturellement tendance à se placer dans un contexte de modification de l'existant (et non une nouvelle construction). Les solutions évoquées pour P1 et P2 l'ont été principalement pour les puits d'accès (5/7) et se résument à remplacer un trou d'homme par une installation hors terre du style cabinet [n° 1-3], à modifier l'espace pour qu'ils soient considérés à occupation continue et sans risque n° 4-5] ou encore à une filtration en continu plutôt qu'un réservoir [n° 72]. On peut rajouter l'exemple tiré des AdC avec l'ajout d'une coupe transversale de l'espace clos avec un vérin. Ces solutions font référence principalement aux types de mesure M6 (conception alternative) ou M4 (aménagement de la configuration intérieur).

Les principes P3 et P4 qui font référence au besoin d'entrer ont été plus populaires avec 54 % des solutions évoquées (60/112). Ce type de mesures semblent mieux correspondre aux exigences du terrain avec un bon compromis entre réduction du risque et faisabilité réelle notamment en modification de l'existant :

- Les 17 solutions liées au principe P3 (élimination du besoin d'entrer pour une tâche spécifique) sont liées en premier lieu au type de mesure M1 basé sur l'utilisation d'équipements d'inspection spécialisés comme les caméras (360°, drone, sous-marins) [p. ex. : n° 6, 37, 76] ou les mesures ultrason [n° 36]. On retrouve ensuite

une méthode de travail alternative suite à une modification de la conception (M7) avec un repositionnement de capteurs [n° 38], du système hydraulique [n° 7], d'un filtre [n° 39] ou une mobilité des pompes [n° 79]. L'automatisation et la robotique (M9 et M14) n'ont pas recueilli de solution spécifique en dehors des drones plutôt classés en M1.

- Les 43 solutions liées au principe P4 (réduction du besoin d'entrée) sont d'abord liées à une meilleure gestion des résidus dans le procédé (p. ex. : M11, M4) comme le brassage du réservoir [n° 53, 55, 87], les dégrilleurs [n° 19, 54, 82], les pentes d'écoulement [n° 12, 45], les vis sans fin [n° 83]. Il y a ensuite l'utilisation d'outils pour faire une partie du travail de l'extérieur (M8) avec des perches [n° 80-81], des jets 360° [n° 48-49] ou des charges explosives [n° 81]. Il y a enfin du travail sur des matériaux plus résistants [n° 18, 51, 86, 104] et les revêtements anti-adhérents [n° 52].

Les solutions en lien avec le principe P5 (améliorer l'accès, l'intervention et l'évacuation) comptent pour 40 % de l'ensemble (45/112). Le type de mesures le plus représenté est M5 (aménagement de l'entrée) avec le positionnement permanent de l'entrée en bas des réservoirs [n° 60-62], un agrandissement de l'entrée [p. ex. : n° 28, 107-108], l'ajout d'ouvertures pour la ventilation mécanique et naturelle afin de libérer l'entrée principale (séparation des fonctions) [n° 22, 60, 106], l'ajout de passerelle, d'escalier, de poignée pour aider l'entrant [p. ex. : 63, 110]. Il y a aussi plusieurs exemples d'ajouts de points d'ancrage et de socles de potence permanents [p. ex. : 91-92]. Beaucoup de propositions ont été faites dans cette catégorie, car même si les effets sur la réduction du risque sont moindres que les autres principes, les investissements sont moins importants et les changements opérationnels limités.

b) Interventions

Concernant les types d'intervention, on dénombre 47 % de solutions transversales, qui ne sont pas spécifiques à une tâche (AE), 21 % de solutions reliées au nettoyage, débouchage (PW, MR, UN), 21 % à la réparation structurelle, mécanique, électrique (IM, RO, RW, IE) et 13 % à l'inspection (VI, II). On note une concentration de solutions dans la base de connaissances pour la maintenance mécanique (IM) dans les puits d'accès notamment pour les pompes submersibles (7/112), la gestion des débris (MR) dans les réservoirs (8/112), ou encore le nettoyage (PW) des bassins (8/112).

c) Problème de conception

Les solutions évoquées ont principalement tenté de répondre : a) à un problème d'accessibilité au point d'intervention depuis l'extérieur (PD1 ; 43 %) à mettre en lien avec les principes P3 et P4 ; b) à la difficulté d'entrer et de se déplacer dans l'espace clos

(PD2 ; 29 %) à mettre en lien avec le principe P5 ; c) à une dégradation des conditions non anticipée (PD9, PD11-13 ; 15 %).

d) Contraintes

Concernant les contraintes techniques, le problème de compatibilité avec l'existant (T2) est celui qui est revenu le plus souvent (19/112). Cela fait notamment référence à la possibilité d'ajouter des entrées de grandes dimensions dans la structure (M5). On retrouve ensuite la problématique de l'espace disponible (T4, 8/112), d'ajout d'équipements (T11, 7/112) et de fiabilité (p. ex. : accessoire, caméra) (T8, 6/112).

Concernant les contraintes de nature organisationnelle, la question du coût et de la rentabilité (G1) est revenue le plus souvent (19/112). Cela concerne notamment le fait que le réaménagement d'une entrée demande un investissement important alors que cette solution ne supprime pas les entrées avec les économies qui viennent avec. On retrouve ensuite les contraintes liées au client (G6, 8/112) et le fait de devoir sous-traiter la mise en application de la solution notamment pour l'inspection (G2).

5.3.2 Utilisation et valorisation de la base de connaissances

Les solutions présentées sont associées à un contexte (c.-à-d. secteur d'activité, type de production, contexte normatif, type et fréquence des interventions, produits permis, etc.). Chaque situation est unique. Ainsi, la transposition d'une solution à un autre contexte est possible, mais devra sans doute faire l'objet d'ajustements et d'une évaluation du retour sur investissement. Par exemple, le principe de pratiquer des ouvertures dans la paroi pour être au plus proche du point d'intervention et rester à l'extérieur dépendra de questions comme l'accessibilité de la paroi à l'endroit visé, la résistance structurelle, la pression dans le réservoir et l'étanchéité. De même, l'efficacité des jets 360° et de l'eau tiède pour le nettoyage dépendra de la présence de recoins, de la forme de la structure pour favoriser l'écoulement, du type de résidus présents, la possibilité d'introduire de la chaleur sans créer un risque atmosphérique, etc. Finalement, l'utilisation de caméra d'inspection, souvent mentionnée, va permettre d'éliminer l'entrée dans l'espace clos dans certains cas pour l'inspection, alors que dans d'autres, elle permettra de seulement de mieux planifier l'entrée.

Les solutions énoncées dans la base de connaissances doivent donc plutôt servir de base de discussion en équipe afin de répondre aux exigences spécifiques d'une situation donnée. Aussi, plusieurs solutions selon les principes P3 à P5 peuvent s'appliquer de manière cumulative sur un même cas.

Les utilisateurs de la base de connaissances (p. ex. : propriétaire, concepteur, intégrateur) doivent être en mesure d'identifier les solutions qui ont du potentiel dans leur contexte. Pour cela, ils doivent être en mesure d'interroger la base de connaissances avec flexibilité

selon les facteurs qui semblent avoir de l'influence dans le contexte. On peut penser à une recherche selon le type d'espace clos, le type de principe de PIPC, le type de problème de conception, le type de risque, le type d'intervention ou encore une combinaison de plusieurs de ces critères. La structure de la base de connaissances permet ce type de recherche. Un outil a donc été développé selon le principe du tableau croisé dynamique afin d'identifier les solutions disponibles selon une combinaison de critères. La figure 14 donne l'exemple d'une recherche de solutions pour réduire la fréquence ou la durée d'une intervention dans une boule de bétonnière (version bêta, partie haute de la figure). Six solutions issues de la base de connaissances sont identifiées par type de mesures et d'intervention (partie basse de la figure 14).

Figure 14. Outil de recherche multicritères pour identifier des solutions dans la base de connaissances.

Query Results		Interventions concerned		
Type of solution(s)	Internal mechanical equipment maintenance	Material removing	Visual Inspection	Total général
Monitoring – Specialized inspection equipment				1
Organizational controls		1	1	2
Replacement of materials			1	1
Specialized tools/products			1	1
Task, equipment and methods alternative design	1			1
Total général		2	3	6

Cet outil de recherche pourra être repris lors du travail subséquent de valorisation pour rendre la base de connaissances disponible de manière interactive. Il en est de même pour la mise à disposition des AdC développés lors de ce projet. Pour rappel, la portée de ce projet de recherche n'inclut pas la phase de valorisation qui fait l'objet d'un travail spécifique à l'IRSST.

5.3.3 Portée et limites

Afin de bâtir une base de connaissances sur les moyens de prévention basés sur la PIPC-EC, une approche transversale a été choisie concernant le secteur d'activité, le type d'espace clos, le type d'intervention ou encore les mesures de réduction du risque. Il en résulte une base de connaissances riche avec plus d'une centaine de solutions liées à la prévention intrinsèque et la protection collective pour les espaces clos et des situations de travail variées. Ce travail original répond à l'objectif principal de cette étude.

L'effet inverse est que la base de données n'est pas spécialisée sur une situation de travail en particulier avec des spécifications techniques précises. L'idée a été de

privilégier la variété de solutions plutôt que le niveau de détails techniques. Cela s'explique aussi par les contraintes liées à la confidentialité en entreprise.

Une limite de l'étude a également été que des concepteurs-fabricants n'ont pas pu être inclus dans l'échantillon d'experts ou les études de cas. Leur point de vue a seulement été abordé par le prisme des propriétaires responsables de la conception côté client. Il s'agit d'une limite de l'étude qui peut d'ailleurs expliquer le peu de solutions en P1 et P2 retenues dans les études de cas. En effet, les solutions en P1 et P2 sont plus difficiles à mettre en œuvre dans un contexte de modification de l'existant (rétrofit). D'ailleurs, les solutions en P1 et P2 ont été plus librement abordées lors de l'exercice avec les arbres de causes et avec les experts.

Concernant de futurs travaux de recherche, la base de connaissances pourrait être enrichie par des retours d'expériences avec des concepteurs-fabricants d'espaces clos. Des retours d'expériences sur des espaces clos déjà couverts lors de cette étude à des fins d'approfondissement et de redondance des données pourraient également être ciblés tout comme d'autres types d'espace clos et dans d'autres secteurs d'activités (p. ex. secteur agricole). Des solutions en lien avec l'automatisation, la robotique et l'IoT (p. ex. : capteur, disponibilité de l'information) pourraient notamment être recherchées. Par ailleurs, le travail de valorisation pour rendre la base de données et les AdC accessibles aux concepteurs et aux propriétaires/utilisateurs d'espace clos devrait être une priorité. Des liens vers des produits disponibles pourraient être ajoutés à cette étape afin d'illustrer certaines solutions.

Finalement, il convient de mentionner les limites de la PIPC-EC en tant que telle. En effet, implanter une solution PIPC-EC de type P3 à P5 ne règle pas tous les problèmes. Malgré ces mesures qui réduisent les risques pour tous les entrants, il faudra continuer de gérer des entrées dans l'espace clos (p. ex. : formation, permis, mesures de gaz, etc.). Il convient également de rappeler qu'une démarche de réduction du risque devrait toujours s'appuyer sur une démarche complète d'évaluation du risque et non simplement sur une approche de déclassement basée sur une conformité réglementaire et l'interprétation d'une définition

CONCLUSION

Une mise à jour des statistiques d'accidents au cours de ce projet a permis de dénombrer 53 décès en espace clos au Québec sur la période 1998-2017 (moyenne de 2,6 décès par an). Au-delà des exigences réglementaires minimales, les moyens de réduction du risque les plus efficaces sont ceux qui agissent à la source (prévention intrinsèque, protection collective). Ces principes mis de l'avant dans les normes et la littérature restaient néanmoins génériques. De plus, leur utilisation sur le terrain n'est pas souvent privilégiée d'après nos précédents travaux sur le terrain pour l'analyse du risque dédié aux espaces clos. Cette étude de recherche s'est donc appuyé sur une revue de la littérature, des rencontres avec 15 experts ayant des profils différents et 19 études de cas en entreprise pour recenser des solutions applicables. Ces solutions sont des exemples concrets pouvant supporter la mise en œuvre de la réglementation et des normes sur la gestion des risques en espace clos. L'originalité de cette étude demeure la centralisation des connaissances dans une base de connaissances.

Le principal livrable de l'étude est ainsi une base de connaissances issue des études de cas sur les moyens de prévention placés le plus haut dans la hiérarchie de réduction du risque pour les interventions en espace clos que ce soit lors d'une nouvelle conception ou lors de modification de l'existant (rétrofit). Ces moyens ont été regroupés sous le terme « prévention intrinsèque et la protection collective » pour les espaces clos (PIPC-EC), une notion raffinée tout au long de l'étude. La PIPC-EC a finalement été définie selon cinq principes : P1) éliminer complètement l'espace ; P2) déclasser en travaillant sur les risques ; P3) supprimer le besoin d'entrer pour une tâche spécifique ; P4) réduire le besoin d'entrer de manière générale ; P5) améliorer l'accès, l'intervention et l'évacuation. Ce découpage a permis notamment de mieux encadrer la notion de déclassement en faisant la distinction entre un déclassement basé sur l'élimination des risques (P2) et un déclassement basé sur la définition réglementaire sans égards aux risques (p. ex. modification de l'accès) pour alléger les obligations lors des entrées. Ce dernier a plutôt été intégré en P5 en soulignant qu'il s'agit d'une approche de réduction du risque partielle qu'il convient d'accompagner d'une évaluation du risque complète.

Au total, 112 solutions portant sur 30 espaces clos dans différents secteurs d'activités (p. ex. : traitement des eaux, distribution électrique/télécom, pâtes et papiers, fabrication de pièces, traitement chimique, transport, maintenance industrielle) ont été compilées dans la base de connaissances. Les détails des solutions sont disponibles du tableau 17 au tableau 21 et en annexe D.I. On peut résumer les solutions exprimées par les chiffres suivants :

- 6 % sur les principes P1 et P2, 54 % sur les principes P3 et P4 et 40 % sur le principe P5. Les options concernant P1 et P2 sont limitées en conditions réelles

notamment à cause du fait que les participants ont eu tendance à se placer dans un contexte de modification de l'existant. Autre constat, la robotique, l'automatisation et l'IoT sont encore peu envisagées/implantées à cause notamment de leur coût et de leurs limites d'utilisation ;

- 33 % en lien avec un espace clos de type réservoir, 30 % pour les puits d'accès/chambres, 21 % pour les bassins, 15 % pour les cheminées et intérieurs d'équipements ;
- 47 % de solutions non spécifiques à une tâche, 21 % de solutions reliées au nettoyage, débouchage, 21 % à la réparation structurelle, mécanique, électrique et 13 % à l'inspection ;
- 43 % en lien avec un problème d'accessibilité au point d'intervention depuis l'extérieur (P3, P4), 29 % avec la difficulté d'entrer et de se déplacer dans l'espace clos (P5) et 15 % en lien avec une dégradation des conditions non anticipée.

Cette base de connaissances, présentée de manière statique par type d'espace clos (p. ex. : puits, d'accès, réservoir, bassin) devra faire l'objet d'une activité de valorisation afin de donner aux utilisateurs un accès interactif pour la recherche de solutions. Chaque solution étant associée à un contexte, leur transposition à un autre contexte devra sans doute faire l'objet d'ajustements. Aussi, cette base de connaissances pourrait être associée à l'outil E.CLOS développé dans un précédent projet de l'IRSST afin d'offrir une démarche de prévention complète pour les espaces clos en alliant un outil d'analyse du risque et des solutions basées sur la réduction du risque à la source. Des travaux de recherche complémentaires pourraient éventuellement permettre de continuer d'enrichir cette base de connaissances en ajoutant des expériences de fabricants d'espace clos, d'autres types d'espace clos ou en approfondissant certaines situations déjà explorées.

Finalement, au-delà de la base de connaissances et des principes de PIPC-EC, cette étude aura permis de livrer d'autres résultats pouvant aider les préventeurs, les concepteurs et les utilisateurs d'espaces clos :

- L'application de la méthode des AdC à 10 cas réels d'accidents en espace clos a permis de démontrer le potentiel de mesures de PIPC pour éviter des situations à risque. La méthode de l'AdC traduit avec précision la relation entre une conception défectueuse et la survenue d'un accident grave. Les 10 AdC disponibles dans ce rapport (annexe C.I) pourraient donc servir de support de formation notamment à l'intention de futurs concepteurs puisque leur implication est point clé dans la prévention des accidents.
- La consultation des normes a permis de fournir des indications sur la taille minimale des ouvertures (p. ex. 977 mm [98 po] pour une ouverture circulaire avec un homme

dans le 95^e percentile, le port de vêtement de protection et d'un APR autonome selon la norme ISO 15534-1 [ISO, 2011]).

- Les entrevues avec les experts ont permis de proposer un modèle à l'intention des concepteurs et des utilisateurs pour appliquer les principes de PIPC-EC (figure 9). Ce modèle inclut la prise en compte des risques préliminaires liés à l'intervention à l'aide de l'outil E.CLOS ainsi que le contexte d'affaires associé à l'espace clos (p. ex. règles de conception, criticité de l'équipement). Ces éléments peuvent être déterminants dans l'adoption de mesures de PIPC. À ce sujet, une prise en compte de l'ensemble du cycle de vie de l'espace clos par le concepteur, une planification à long terme des investissements par l'utilisateur et un engagement dans la relation concepteur-utilisateur concernant la SST sont des leviers importants selon les experts. L'ensemble des facteurs favorisant et des contraintes quant à l'adoption de mesures de PIPC-EC sont disponibles au tableau 11.
- Les tables constitutives de la base de connaissances sont également un résultat original puisqu'elles catégorisent à la fois les types de mesures possibles dans un contexte de PIPC-EC, les types de problèmes de conception et les principales contraintes d'implantation.

La réduction des risques à la source est un moyen à privilégier selon la législation. Dans cette perspective, le contenu de ce rapport offre des propositions claires aux milieux, tout comme au législateur, pour le contexte spécifique du travail en espace clos.

BIBLIOGRAPHIE

- Alsayed, A., Nabawy, M.R.A., Yunusa-Kaltungo, A., Quinn, M.K. et Arvin F. (2021). An autonomous mapping approach for confined spaces using flying robots. Dans C. Fox, J. Gao, A. Ghalamzan Esfahani, M. Saaj, M. Hanheide et S. Parsons (édit.), *Towards autonomous robotic systems. TAROS 2021. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 13054. Springer.
- American Industrial Hygiene Association. (2014). *Prevention through design: eliminating confined spaces and minimizing hazards*. Falls church, VA: AIHA.
- American National Standards Institute et American Society of Safety Engineers. (2011). *Prevention through design: guidelines for addressing occupational hazards and risks in design and redesign processes*. Norme ANSI/ASSE : Z590.3.
- American National Standards Institute et American Society of Safety Engineers. (2016). *Safety requirements for entering confined spaces*. Norme ANSI/ASSE : Z117.1.
- Amin, Z., Mohammad, R., Othman, N., Amrin, A., Aziz, S. A. et Maarop, N. (2018). Recent Review on Legislations Related to Risk Assessment for Confined Space. *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, 9(1), 934-949.
- Andéol-Aussage, B., Compiègne, I., Curry, X., Fadier, É. et Duval, C. (2013). *L'analyse de l'accident du travail – La méthode de l'arbre des causes* (Rapport n° ED 6163). INRS. <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206163>
- Association canadienne de normalisation, 2016. *Gestion du travail dans les espaces clos*. Norme CSA Z1006.
- Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail, secteur « affaires municipales ». (2016). *Enquête et analyse des accidents*. <https://www.apsam.com/theme/gestion/identification-des-risques/enquete-et-analyse-des-accidents>
- Athar, M., Shariff, A. M, Buang, A., Nazir, S., Hermansyah, H. et See, T. L. (2019). Process equipment common attributes for inherently safer process design at preliminary design stage, *Process Saf. Environ. Prot.*, 128, 14-29. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.033>
- Behm, M. (2005). Linking construction fatalities to the design for construction safety concept. *Saf. Sci.*, 43(8), 589-611. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2005.04.002>
- Böhm, A. (2004). Theoretical coding: text analysis in grounded theory. Dans U. Flick, E. Kardorff et I. Steinke (édit.), *A companion to qualitative research* (p. 270-275). SAGE Publications.

- Botti, L., Bragatto, P.A., Duraccio, V., Gnoni, M.G. et Mora, C. (2016). Adopting IOT technologies to control risks in confined space: a multi-criteria decision tool. *Chemical Engineering Transactions*, 53, 127-132. <https://doi.org/10.3303/CET1653022>
- Botti, L., Ferrari, E. et Mora, C. (2017a). Automated entry technologies for confined space work activities: a survey. *Journal of Occupational and Environment Hygiene*, 14(4), 271-284. <https://doi.org/10.1080/15459624.2016.1250003>
- Botti, L., Mora, C. et Ferrari, E. (2017b). A methodology for the identification of confined spaces in industry. Dans G. Campana, R. Howlett, R. Setchi et B. Cimatti (édit.), *Sustainable Design and Manufacturing 2017. SDM 2017. Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol. 68. Springer.
- Brikci, N. et Green, J. (2007). *A guide to using qualitative research methodology*. Health Services Research Unit: London School of Hygiene and Tropical Medicine.
- Burlet-Vienney, D., Chinniah, Y. et Bahloul, A. (2014). The need for a comprehensive approach to managing confined space entry: summary of the literature and recommendations for next steps. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 11(8), 485-498. <https://doi.org/10.1080/15459624.2013.877589>
- Burlet-Vienney, D., Chinniah, Y., Bahloul, A. et Roberge, B. (2015a). Risk management implementation for confined space interventions in Quebec. *Saf. sci.*, 79, 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.05.003>
- Burlet-Vienney, D., Chinniah, Y., Bahloul, A. et Roberge, B. (2015b). Design and application of a 5 step risk assessment tool for confined space entries. *Saf. sci.*, 80, 144-155. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.07.022>
- Burlet-Vienney, D., Chinniah, Y., Bahloul, A. et Roberge, B. (2016). Risk analysis for confined space entries: critical analysis of 4 tools applied to 3 risk scenarios. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 13(6), D99-D108. <https://doi.org/10.1080/15459624.2016.1143949>
- Caisse nationale de l'assurance maladie des travailleurs salariés. (2010). *Prévention des accidents lors des travaux en espaces confinée (Recommandation R 447)*. INRS. <https://www.ameli.fr/sites/default/files/Documents/31219/document/r447.pdf>
- Carter, N., Bryant-Lukosius, D., DiCenso, A., Blythe, J. et Neville, A.J. (2014). The use of triangulation in qualitative research. *Oncol Nurs Forum*, 41(5), 545-547. <https://doi.org/10.1188/14.ONF.545-547>
- Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2008). Worked examples and case studies. Dans *Inherently Safer Chemical Processes: A Life Cycle Approach*, (p. 251-286). Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470925195.ch11>
- Chen, P. (1976). The entity-relationship model—toward a unified view of data. *ACM Trans. Database Syst.*, 1(1), 9-36. <https://doi.org/10.1145/320434.320440>

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

- Chinniah Y., Bahloul A., Bulet-Vienney D. et Roberge, B. (2016). *Développement d'un outil d'analyse du risque et de catégorisation des interventions en espace clos* (Rapport n° R-928). IRSST. <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-928.pdf>
- Ciobotici Terryn, I.C., Cocarcea Rusei, A., Stamate, M. et Lazar, I. (2016). Eco-innovative technologies for mitigating gaseous emissions from wastewater collection systems. *Environ. Eng. Manag. J.*, 15(3), 613-625. <https://doi.org/10.30638/eemj.2016.067>
- Code de sécurité pour les travaux de la construction. RLRQ, c. S-2.1, r.4.
- Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail. (2005). *Rapport d'enquête* (Rapport n° EN-003536). CNESST. <https://www.centredoc.cnesst.gouv.qc.ca/pdf/Enquete/ed003536.pdf>
- Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail. (2021). *Analyse d'impact réglementaire. Projet de Règlement modifiant le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (S-2.1, r. 13) relativement aux espaces clos*. CNESST. https://www.cnesst.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/rsst-espaces-clos_0.pdf
- Dandan, K., Albitar, H., Ananiev, A. et Kalaykov, I. (2016). Confined spaces: cleaning techniques and robot-based surface cleaning. *Am. Sci. Res. J. Eng. Tech. Sci.*, 22(1), 210–230.
- Denstadli, J.M., Julsrud, T.E. et Hjorthol, R.J. (2012). Videoconferencing as a mode of communication: a comparative study of the use of videoconferencing and face-to-face meetings. *Journal of Business and Technical Communication*, 26(1), 65-91. <https://doi.org/10.1177/1050651911421125>
- Dowd, D. et Daher, E. (2019, 23-24 avril). *Redefining confined space safety: a case study* [Communication]. SPE Symposium Asia Pacific Health, Safety, Security, Environment and Social Responsibility, Kuala Lumpur, Malaysia. <https://doi.org/10.2118/195399-MS>
- Dubreuil, D. (2021). *Espaces clos : nouvelles dispositions réglementaires à compter d'octobre pour les entreprises de compétence fédérale*. <https://www.centrepatronalsst.qc.ca/publications/infos-sst-bonjour/prevention-et-securite/espaces-clos-nouvelles-dispositions-reglementaires/>
- Flynn, M.R. et Susi, P. (2009). Manganese, iron, and total particulate exposures to welders. *Journal of Occupational and Environment Hygiene*, 7(2), 115-126. <https://doi.org/10.1080/15459620903454600>
- Gambatese, J.A., Toole, T.M. et Abowitz, D.A. (2017). Owner perceptions of barriers to prevention through design diffusion. *J. Construc. Eng. Manag.*, 143(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001296](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001296)

- Gauthier, F., Chinniah, Y., Abdul-Nour, G., Jocelyn, S., Aucourt, B., Bordeleau, G. et Ben Mosbah, A. (2021). Practices and needs of machinery designers and manufacturers in safety of machinery: An exploratory study in the province of Quebec. *Saf Sci*, 133(1). <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105011>
- Gazette officielle du Québec. (2022). *Projet de règlement modifiant le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (S-2.1, r. 13) relativement aux espaces clos*. Éditeur officiel du Québec. <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=1&file=76222.pdf>
- Gillham, B. (2000). *The research interview*. Continuum.
- González Cortés A., Bulet-Vienney, D. et Chinniah, Y. (2021a). Inherently safer design: An accident prevention perspective on reported confined space fatalities in Quebec. *Process Saf. Environ. Prot.*, 149(5), 794-816. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.03.026>
- González Cortés A., Bulet-Vienney, D., Chinniah, Y., Ben Mosbah, A., Bahloul A. et Ouellet, C. (2021b). Inherently Safer Design (ISD) solutions in confined spaces: experts' practical feedback in Quebec, Canada. *Process Saf. Environ. Prot.* 157(1), 375-389. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.11.044>
- Government of United Kingdom. (1997). *The confined spaces regulations 1997 No. 1713*. The Stationery Office Limited. <https://www.legislation.gov.uk/uksi/1997/1713/made>
- Guénette, É., Poulin, S., Boivin, G., Côté, D., Gagnon, P. et Morissette Plourde, M.-L. (2011). *Recommandations sur la protection contre les chutes pour les réservoirs d'eau potable ainsi que les installations similaires (espaces clos)*. APSAM. <http://www.apsam.com/sites/default/files/docs/themes/travail/recommandations-conception-reservoir.pdf>
- Gupta, J. P. et Edwards, D.W. (2002). Inherently safer design—present and future. *Process Saf. Environ. Prot.*, 80(3), 115-125. <https://doi.org/10.1205/095758202317576210>
- Harms-Ringdahl, L. (2001). *Safety analysis – principles and practice in occupational safety* (2e éd.). Taylor and Francis. <https://doi.org/10.1201/9780203302736>
- Hendershot, D. C. (2011). Inherently safer design. An overview of key elements. *Prof. Saf.*, 56(2), 48-56.
- Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques. (2009). *Règles de sécurité des installations de méthanisation agricole*. INERIS. <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/guide-methanisation-def-1.pdf>
- Institut National de Recherche et de Sécurité. (2014). *Les espaces confinés* (Rapport n° ED 6184). INRS. <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206184>

IRSSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

- Institut National de Recherche et de Sécurité. (2014). *Protection collective*. <https://www.inrs.fr/demarche/protection-collective/ce-qu-il-faut-retenir.html>
- Institut National de Recherche et de Sécurité (2015). *Espaces confinés. Guide pratique de ventilation* (Rapport n° ED 703). INRS. <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20703>
- Institut National de Recherche et de Sécurité et al. (2010). *Poste de relèvement sur les réseaux d'assainissement – Conception et aménagement des situations de travail* (Rapport n° ED 6076). INRS. <https://www.inrs.fr/dms/inrs/CataloguePapier/ED/TI-ED-6076/ed6076.pdf>
- Institut National de Recherche et de Sécurité et Fédération Nationale des Syndicats de l'Assainissement et de la Maintenance Industrielle. (2010). *Interventions en espaces confinés dans les ouvrages d'assainissement. Obligations de sécurité* (Rapport n° ED 6026). INRS. <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206026>
- International Organization for Standardization. (2010). *Sécurité des machines - Principes généraux de conception - Appréciation du risque et réduction du risque*. Norme ISO12100.
- International Organization for Standardization. (2000). *Ergonomic design for the safety of machinery — Part 1: Principles for determining the dimensions required for openings for whole-body access into machinery*. Norme ISO 15534-1.
- Jiao, Z., Yuan, S., Ji, C., Mannan, M. et Wang, Q. (2019). Optimization of dilution ventilation layout design in confined environments using Computational Fluid Dynamics (CFD). *J. Loss Prev. Process. Ind.*, 60(2019), 195-202. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.05.002>
- Journal officiel de l'Union européenne. (1989). *Directive 89/391/CEE du Conseil - Mesures visant à améliorer la sécurité et la santé des travailleurs au travail*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A31989L0391>
- Kasirossafar, M., Shahbodaghlou, F. (2015). Construction design: its role in incident prevention. *Prof. Saf.*, 60(10), 42-46.
- Katsakiori, P., Sakellaropoulos, G. et Manatakis, E. (2009). Towards an evaluation of accident investigation methods in terms of their alignment with accident causation models. *Saf. Sci.*, 47(7), 1007-1015. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.11.002>
- Khan, F., Rathnayaka, S. et Ahmed, S. (2015). Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. *Process Saf. Environ. Prot.*, 98(11), 116-147. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.07.005>
- Kiehl, Z. A., Durkee, K. T., Halverson, K. C., Christensen, J. C. et Hellstern, G. F. (2020). Transforming work through human sensing: a confined space monitoring application. *Struc. Health Monit.*, 19(1), 186–201. <https://doi.org/10.1177/1475921719840994>

- Kletz, T. A. (2003). Inherently safer design—Its scope and future. *Process Saf. Environ. Prot.*, 81(6), 401-405. <https://doi.org/10.1205/095758203770866566>
- Koester, C. (2018). *We must change the statistics of confined space injuries and fatalities.* <https://ohsonline.com/Articles/2018/08/01/We-Must-Change-the-Statistics-of-Confining-Space-Injuries-and-Fatalities.aspx?p=1>
- Lamba, A. (2013). Practice: designing out hazards in the real world. *Prof. Saf.*, 58(1), 34-40.
- Lanoie, P. et Tavenas, S. (1996). Costs and benefits of preventing workplace accidents: the case of participatory ergonomics. *Saf. Sci.*, 24, 181-196. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(97\)81482-8](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(97)81482-8)
- Lebeau, M., Duguay, P. et Boucher, A. (2014). *Les coûts des lésions professionnelles au Québec, 2005-2007* (Rapport n° R-769). IRSST. <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/pubirsst/r-769.pdf>
- Lecompte-Boinet, G. (2017). Aéronautique : drones, à chacun son métier ! *Industrie et Technologies*, 997(4), 8-9.
- Leclerc, F. (2018). *Un drone équipé d'un bras robot facilite les travaux industriels.* <https://www.industrie-techno.com/article/un-drone-equipe-d-un-bras-robot-facilite-les-travaux-industriels.52594>.
- Leplat, J. (1978). Accident analysis and work analysis. *J. Occup. Accid.*, 1(1978), 331-340.
- Levine, B. (2019). Confined spaces – Reducing the risks of entry with remote video inspection technology. *Prof. Saf.*, 64(12), 16-17.
- Loi sur la santé et la sécurité du travail. RLRQ, c. S-2.1.
- Lyon, B.K. et Popov, G. (2019). Risk treatment strategies. Harmonizing the hierarchy of controls and inherently safer design concepts. *Prof. Saf.*, 64(5), 34-43.
- McManus, T. N. et Haddad, A. N. (2018). Risk minimization in isolated subsurface structures through ventilation induced by natural forces. *Saf. Sci.*, 102, 125-133. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.009>
- Microsoft Corporation. (2010). Microsoft Excel (Version 2016) [Logiciel]. Microsoft Corporation
- Ministère du Travail de l'Ontario. (2011). *Confined spaces guideline.* https://www.labour.gov.on.ca/english/hs/pubs/confined/cs_4.php
- Monteau M. et Favaro M. (1988). *Bilan des méthodes d'analyses a priori des risques 1 et 2.* INRS.
- Morrison, C. (2008). Strategy to demonstrate the value of industrial hygiene. *The Synergist*, 19(6), 46-51.

- Moura, R., Beer, M., Patelli, E., Lewis, J. et Knoll, F. (2016). Learning from major accidents to improve system design. *Saf. Sci.*, 84, 37-45. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.11.022>
- National Fire Protection Association. (2019). *Guide for safe confined space entry and work* (NFPA 350). Quincy, MA: NFPA.
- Nonaka, I. (1991). The knowledge creating company. *Harvard Business Review*, 69(6), 96-104
- Occupational Health and safety Act. Chapitre O.1, r.632/05.
- Palinkas, L., Horwitz, S., Green, C., Wisdom, J., Duan, N. et Hoagwood, K. (2015). Purposeful sampling for qualitative data collection and analysis in mixed method implementation research. *Administration & Policy In Mental Health & Mental Health Services Research*, 42(5), 533-544. <https://doi.org/10.1007/s10488-013-0528-y>
- Pasman, H. J. et Fabiano, B. (2021). The delft 1974 and 2019 European loss prevention symposia: highlights and an impression of process safety evolutionary changes from the 1st to the 16th LPS. *Process Saf. Environ. Prot.*, 147(2021), 80-91. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.09.024>
- Parn, E., Edwards, D., Riaz, Z., Mehmood, F. et Lai, J. (2019). Engineering-out hazards: digitising the management working safety in confined spaces. *Facilities*, 37(3/4), 196-215. <https://doi.org/10.1108/F-03-2018-0039>
- Patton, M.Q. (2002). *Qualitative research and evaluation methods* (3e éd.). SAGE publications.
- Pearce, N. (2016). *Thinking outside the confined space box*. <https://synergist.aiha.org/201609-thinking-outside-confined-space-box>
- Pearce, N. A. et Rusczyk, R. A. (2017, 19-22 juin). *NFPA 350. Guide for safe confined space entry and work* [Communication]. The ASSE Professional Development Conference and Exposition, Denver, CO.
- Petrлік, M., Báča, T., Heřt, D., Vrba, M., Krajník, T. et Saska, M. (2020). A robust UAV system for operations in a constrained environment. *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 5(2), 2169-2176. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2970980>
- Pettit, T. et Linn, H. (1987). *A guide to safety in confined spaces* (Rapport n° 87-113). National Institute for Occupational Safety and Health. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/87-113/pdfs/87-113.pdf?id=10.26616/NIOSH PUB87113>
- Pouzou, J.G., Warner, C., Neitzel, R.L., Croteau, G.A., Yost, M.G. et Seixas, N.S. (2015). Confined space ventilation by shipyard welders: observed use and effectiveness. *Ann Occup Hyg.*, 59(1), 116-121. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meu070>
- Rayner Brown, K., Hastie, M., Khan, F. I. et Amyotte, P. R. (2021). Inherently safer design protocol for process hazard analysis. *Process Saf. Environ. Prot.*, 149, 199-211. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.10.046>

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

Règlement sur la santé et la sécurité du travail. RLRQ, c. S-2.1, r.13.

Rekus, J.F. (1994). *Complete confined spaces handbook*. Lewis Publishers.

Riaz, Z., Arslan, M., Kiani, A. K. et Azhar, S. (2014). CoSMoS: A BIM and wireless sensor based integrated solution for worker safety in confined spaces. *Autom. Constr.*, 45, 96-106. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.010>

Riedel, S.M. et Field, W.E. (2013). Summation of the frequency, severity, and primary causative factors associated with injuries and fatalities involving confined spaces in agriculture. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 19(2), 83-100. <https://doi.org/10.13031/jash.19.9326>

Sabourin, G. (2017). *Le lisier peut tuer vite et sournoisement*. <https://www.preventionautravail.com/reportages/497-le-lisier-peut-tuer-vite-et-sournoisement.html>

Sabourin, G. (2018). *Le rôle majeur des ASP dans les projets novateurs : conception d'un nouveau réservoir plus sécuritaire*. <https://www.preventionautravail.com/reportages/526-le-role-majeur-des-asp-dans-les-projets-novateurs.html>

Safe Work Australia. (2014). *Work-related fatalities associated with unsafe design of machinery, plant and powered tools, 2006 – 2011*. Safe Work Australia. <https://www.safeworkaustralia.gov.au/system/files/documents/1702/work-related-fatalities-unsafe-design.pdf>

Selman, J., Spickett, J., Jansz, J. et Mullins, B. (2017). Work-related traumatic fatal injuries involving confined spaces in Australia, 2000-2012. *Journal of Health, Safety and Environment*, 33(2).

Selman, J., Spickett, J., Jansz, J. et Mullins, B. (2018). An investigation into the rate and mechanism of incident of work-related confined space fatalities. *Saf. Sci.*, 109, 333-343. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.014>

Sherehiy, B. et Karwowski, W. (2006). Knowledge management for occupational safety, health, and ergonomics. *Hum. Factors Ergon. Manuf.*, 16(3), 309-319. <https://doi.org/10.1002/hfm.2005>

Smith, T.D., Herron, R., Le, A., Wilson, J.K., Marion, J. et Vicenzi, D.A. (2018). Assessment of confined space entry and rescue training for aircraft rescue and fire fighting (ARFF) members in the United States. *J. Safety Res.*, 67, 77-82. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2018.09.014>

Smith & Loveless Inc. (2016). *Everlast - Wet well mounted pump stations (brochure 602)*. https://www.smithandloveless.com/sites/default/files/602_EVERLAST_WWMPs_e_3.pdf

Standards Australia (2009). *Safe working in a confined space*. Norme AS/NZS 2865.

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

- Statistique Canada. (2013). *Échantillonnage non probabiliste*.
<https://www.statcan.gc.ca/edu/power-pouvoir/ch13/nonprob/5214898-fra.htm#a3>
- Stefana, E., Marciano, F., Drolet, D. et Armstrong, T.W. (2021). A traditional near field-far field approach-based model and a spreadsheet workbook to manage oxygen deficiency hazard. *Process Saf. Environ. Prot.*, 149(2021), 537-556.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.11.014>
- Strong, D.M., Lee, Y.W. et Wang, R.Y. (1997). Data quality in context. *Commun. ACM*, 40(5), 103-110. <https://doi.org/10.1145/253769.253804>
- Svedberg, U., Petrini, C., Johanson, G. (2009). Oxygen depletion and formation of toxic gases following sea transportation of logs and wood chips. *Annals of Occupational Hygiene*, 53(8), 779-787. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mep055>
- Tompa, E., Dolinschi, R. et Natale, J. (2013). Economic evaluation of a participatory ergonomics intervention in a textile plant. *Appl. Ergon.*, 44(3), 480-487.
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2012.10.019>
- Trudel, A. et Gilbert, D. (2000). *Les espaces clos : pour en sortir sain et sauf : Guide de prévention* (2e éd.). APSAM.
<https://www.apsam.com/sites/default/files/docs/publications/espaces-clos-guide.pdf>
- U.S. Bureau of Labor Statistics. (2021). *Fact sheet - Fatal occupational injuries involving confined spaces - July 2020*. <https://www.bls.gov/iif/oshwc/cfoi/confined-spaces-2011-18.htm>
- U.S. Department of Defense. (1998). *Department of defense design criteria standard: human engineering*. Norme MIL-STD-1472F.
- Wang, B. et Zhao, J. (2021). Automatic frequency estimation of contributory factors for confined space accidents. *Process Saf. Environ. Prot.* 157(1), 193-207.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.11.044>
- Wilson, M.P., Madison, H.N. et Healy, S.B. (2012). Confined space emergency response: Assessing employer and fire department practices. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 9(2), 120-128. <https://doi.org/10.1080/15459624.2011.646644>
- Windapo, A. O., Oyewobi, L. et Zwane, Z. (2014). Investigation of stakeholders' awareness and adoption of Inherently Safer Design (ISD) principles in South African utility industry projects. *J Loss Prev. Process Ind.*, 32, 152-160.
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.08.006>
- WorkSafe BC. (2013). *Hazards of confined spaces*.
<https://www.worksafebc.com/resources/health-safety/books-guides/hazards-of-confined-spaces>

- WorkSafe NB. (2019). *Confined space – Continuous Human Occupancy*.
<https://www.worksafenb.ca/interpretations/en/confined-space-continuous-human-occupancy.html>
- Wysocky, K. (2017a). *Light a fire: smoke system provides an alternative to CCTV when obnoxious odors are tough to locate*.
https://www.cleaner.com/editorial/2017/05/light_a_fire
- Wysocky, K., (2017b). *A sound investment*.
https://www.cleaner.com/editorial/2017/04/a_sound_investment
- Yuan, J., Li, X., Xiahou, X., Tymvios, N., Zhou, Z. et Li, Q. (2019). Accident prevention through design (PtD): integration of building information modeling and PtD knowledge base. *Autom. Constr.*, 102(2019), 86-104. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.015>
- Zainal Abidin, M., Rusli, R., Khan, F. et Mohd Shariff, A. (2018). Development of inherent safety benefits index to analyse the impact of inherent safety implementation. *Process Saf. Environ. Prot.*, 117, 454-472. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.013>
- Zarges, T. et Giles, B. (2008). Prevention through design (PtD). *J. Safety Res.*, 39(2), 123-126. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2008.02.020>

ANNEXE A

A.I Certificat de conformité éthique



CERTIFICAT DE CONFORMITÉ

Montréal, le 25 mai 2018

M. Yuvin Chinniah
M. Damien Buret-Vienney
Département de génie mathématiques et génie industriel
Polytechnique Montréal

N/Réf : Dossier CÉR-1617-71

Messieurs,

J'ai le plaisir de vous informer que les membres du Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains (CÉR) ont procédé à l'évaluation en comité restreint du projet de recherche intitulé « Réduction des risques pour les interventions en espace clos – Étude sur l'utilisation de moyens basés sur la protection collective permanente », sur la base des documents et informations que vous nous avez fournis.

Les membres du CÉR ayant examiné votre projet en ont recommandé l'approbation sur la base des précisions que vous nous avez fait parvenir ainsi que des réponses aux questions et commentaires du CÉR.

Veillez noter que le présent certificat est valable pour une durée d'un an, soit du **25 mai 2018** au **24 mai 2019**, pour le projet tel que soumis au Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains.

Afin d'éviter des délais de renouvellement de votre certificat, le cas échéant, nous vous saurions gré de nous faire parvenir un bref rapport annuel au moins un mois avant l'expiration du présent certificat (<http://www.polymtl.ca/recherche/document/deonto.php>). La coordonnatrice du CÉR devra aussi être informée de toute modification qui pourrait être apportée ultérieurement au protocole expérimental, de même que de tout problème imprévu pouvant avoir une incidence sur la santé et la sécurité des personnes impliquées dans le projet de recherche (sujets, professionnels de recherche ou chercheurs).

Je vous souhaite bonne chance dans la poursuite de vos travaux.

Delphine Périé-Curnier, Présidente
Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains

cc: Céline Roehrig (DFR) ; Sylvie Proulx (Service des Finances)

Comité d'éthique de la recherche
avec des êtres humains
Céline Roehrig, Coordonnatrice
Delphine Périé-Curnier, Présidente
Tél.: 514 340-4711 poste : 3755
Fax : 514 340-4992
Courriel : polycer@polymtl.ca

Adresse postale
C.P. 6079, succ. Centre-Ville
Montréal (Québec) Canada H3C 3A7

Campus de l'Université de Montréal
2900, boul. Édouard-Montpetit
2500, chemin de Polytechnique
Montréal (Québec) Canada H3T1J4

ANNEXE B

B.I Questionnaire pour les entrevues avec les experts (Guide d'entretien)

Le tableau 23 présente le questionnaire utilisé avec les experts lors de la phase 2 du projet.

Tableau 23. Questionnaire utilisé pour les entrevues avec les experts

1. PARTICIPANT	
Entreprise/Employeur ⁽¹⁰⁾	Secteur d'activité ⁽¹⁰⁰⁾ : Type d'activités ⁽¹⁰¹⁾ : Informations pertinentes en lien avec la SST ⁽¹⁰²⁾ :
Fonctions actuelles ⁽¹¹⁾	Fonction principale ⁽¹¹⁰⁾ : Rôle et responsabilités actuelles en lien avec le travail en espace clos ⁽¹¹¹⁾ :
Formation ⁽¹²⁾	Formation professionnelle ⁽¹²⁰⁾ : Formation en lien avec les espaces clos ⁽¹²¹⁾ :
Expériences ⁽¹³⁾	Années d'expérience en lien avec les espaces clos et la gestion des risques ⁽¹³⁰⁾ : Expériences antérieures (rôle, nature, durée) ⁽¹³¹⁾ : Types d'espaces clos, types d'intervention principalement gérés ⁽¹³²⁾ : Nombre de participations à la gestion des entrées en espace clos dans la dernière année ⁽¹³³⁾ :
2. GESTION DU RISQUE LIÉE AUX INTERVENTIONS EN ESPACE CLOS	
Aspects réglementaires ⁽²⁰⁾	Difficultés ⁽²⁰⁰⁾ : Suggestions pour pallier ces difficultés ⁽²⁰¹⁾ :
Identification et estimation des risques en espace clos ⁽²¹⁾	Outils utilisés ⁽²¹⁰⁾ : Difficultés ⁽²¹¹⁾ : Suggestions pour pallier ces difficultés ⁽²¹²⁾ :
Permis d'entrée ⁽²²⁾	Outils utilisés ⁽²²⁰⁾ : Difficultés ⁽²²¹⁾ : Suggestions pour pallier ces difficultés ⁽²²²⁾ :
Sauvetage ⁽²³⁾	Planification et moyens mis en place ⁽²³⁰⁾ : Difficultés ⁽²³¹⁾ : Suggestions pour pallier ces difficultés ⁽²³²⁾ :
Audit des interventions ⁽²⁴⁾	Outils utilisés ⁽²⁴⁰⁾ : Difficultés ⁽²⁴¹⁾ : Suggestions pour pallier ces difficultés ⁽²⁴²⁾ :
Sous-traitance ⁽²⁵⁾	Méthodes utilisées ⁽²⁵⁰⁾ : Difficultés ⁽²⁵¹⁾ : Suggestions pour pallier ces difficultés ⁽²⁵²⁾ :
Formation ⁽²⁶⁾	Outils utilisés ⁽²⁶⁰⁾ : Difficultés ⁽²⁶¹⁾ : Suggestions pour pallier ces difficultés ⁽²⁶²⁾ :
3. RÉDUCTION DES RISQUES	
Passé-proches, incidents ⁽³⁰⁾	Avez-vous des exemples de passés proches ou d'incidents causés par des lacunes au niveau de la réduction des risques (p. ex. : moyens inexistants/inadéquats, permis d'entrée non appliqué) ? ⁽³⁰⁰⁾ Oui/Non Si oui, exemples :
Moyens usuels de réduction du risque par famille de risque ⁽³¹⁾	Quelles sont les stratégies de réduction du risque habituellement utilisées pour les familles de risques suivantes ? Quelles sont les difficultés associées ? ⁽³¹⁰⁾ - Atmosphérique (p. ex. asphyxie, intoxication, explosion) : - Chimique (p. ex. : produits toxiques, irritants, cancérigènes) : - Biologique (p. ex. : produit en décomposition, agents pathogènes) : - Chute (p. ex. : hauteur, plain-pied, d'objet) : - Mécanique (p. ex. : pièce en mouvement, projection) : - Physique (p. ex. : électricité, ensevelissement, rayonnements, bruit, vibration,

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

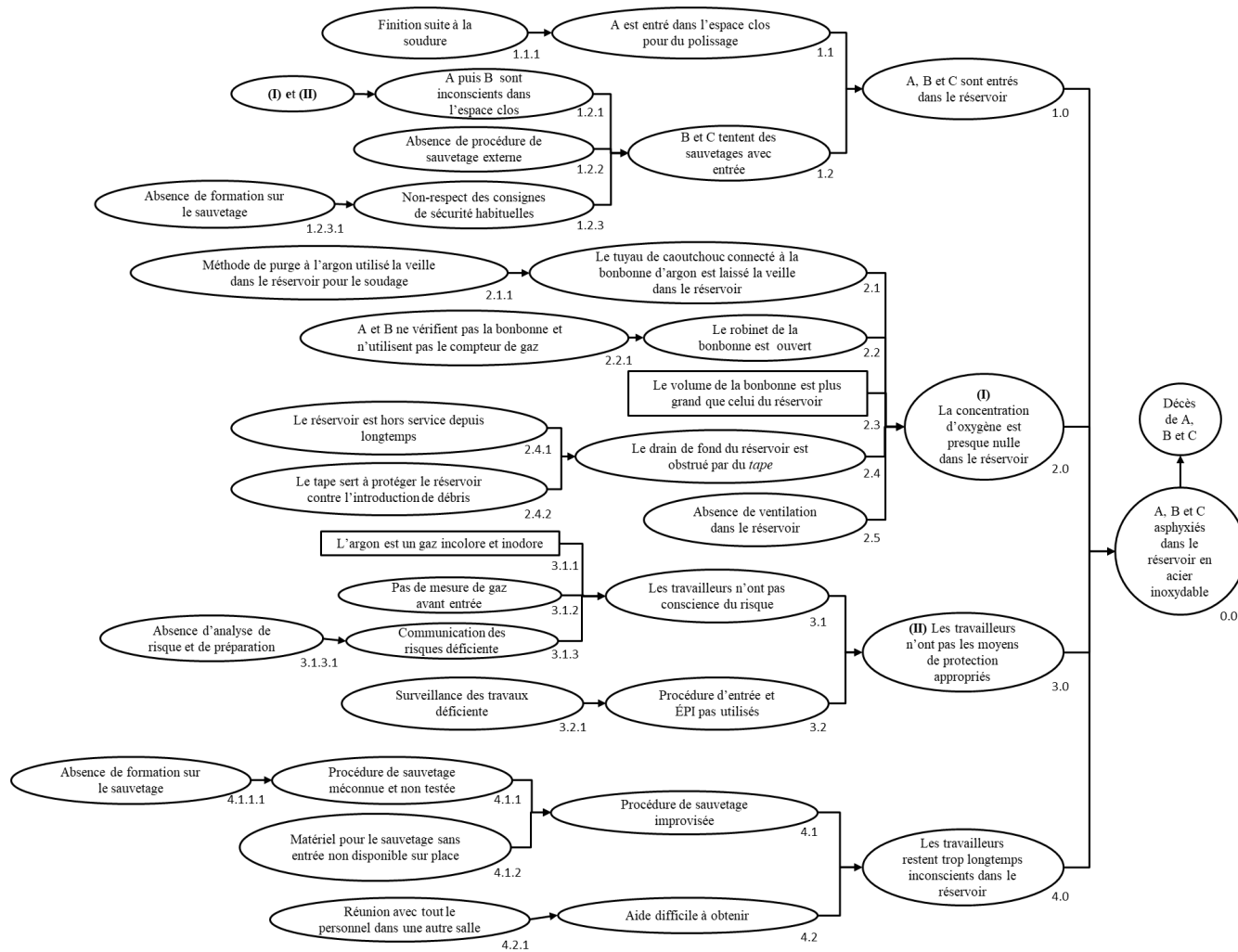
	<p>noyade, température) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ergonomie (p. ex. : posture contraignante, efforts physiques, stress) : - Sauvetage :
<p>Mesures de prévention intrinsèque et de protection collective ⁽³²⁾</p>	<p>Selon vous est-ce que ces principes sont connus et utilisés dans l'industrie ? ⁽³²⁰⁾</p> <ul style="list-style-type: none"> - Supprimer l'espace clos par la conception : Connue (Oui/non) ; Utilisée (Oui/Non) - Éviter l'entrée dans l'espace clos : Connue (Oui/non) ; Utilisée (Oui/Non) - Diminuer l'intensité d'un danger à la conception : Connue (Oui/non) ; Utilisée (Oui/Non) - Intégrer des moyens de protection collective et de sauvetage à la conception : Connue (Oui/non) ; Utilisée (Oui/Non) <p>Avez-vous des solutions basées sur ces principes à partager (solutions imaginées, vues dans la littérature, etc.) ? ⁽³²⁴⁾</p> <p>Si non, pour quelles raisons selon vous (si plusieurs réponses les classer par ordre d'importance) ? ⁽³²²⁾</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nombre d'interventions faible qui limite les investissements - Approche coût/bénéfice à court terme - Anticipation d'un travail d'innovation coûteux et peu applicable - Habitude de procéder avec des moyens temporaires (p. ex. EPI) - Manque de connaissances et d'expérience sur la mise en place de mesures liées à la conception ou à l'intégration de dispositifs d'ingénierie <p>Quels pourraient être des facteurs favorisant leur utilisation selon vous ? ⁽³²³⁾</p>

ANNEXE C

C.1 Arbres des causes, accidents mortels en espace clos

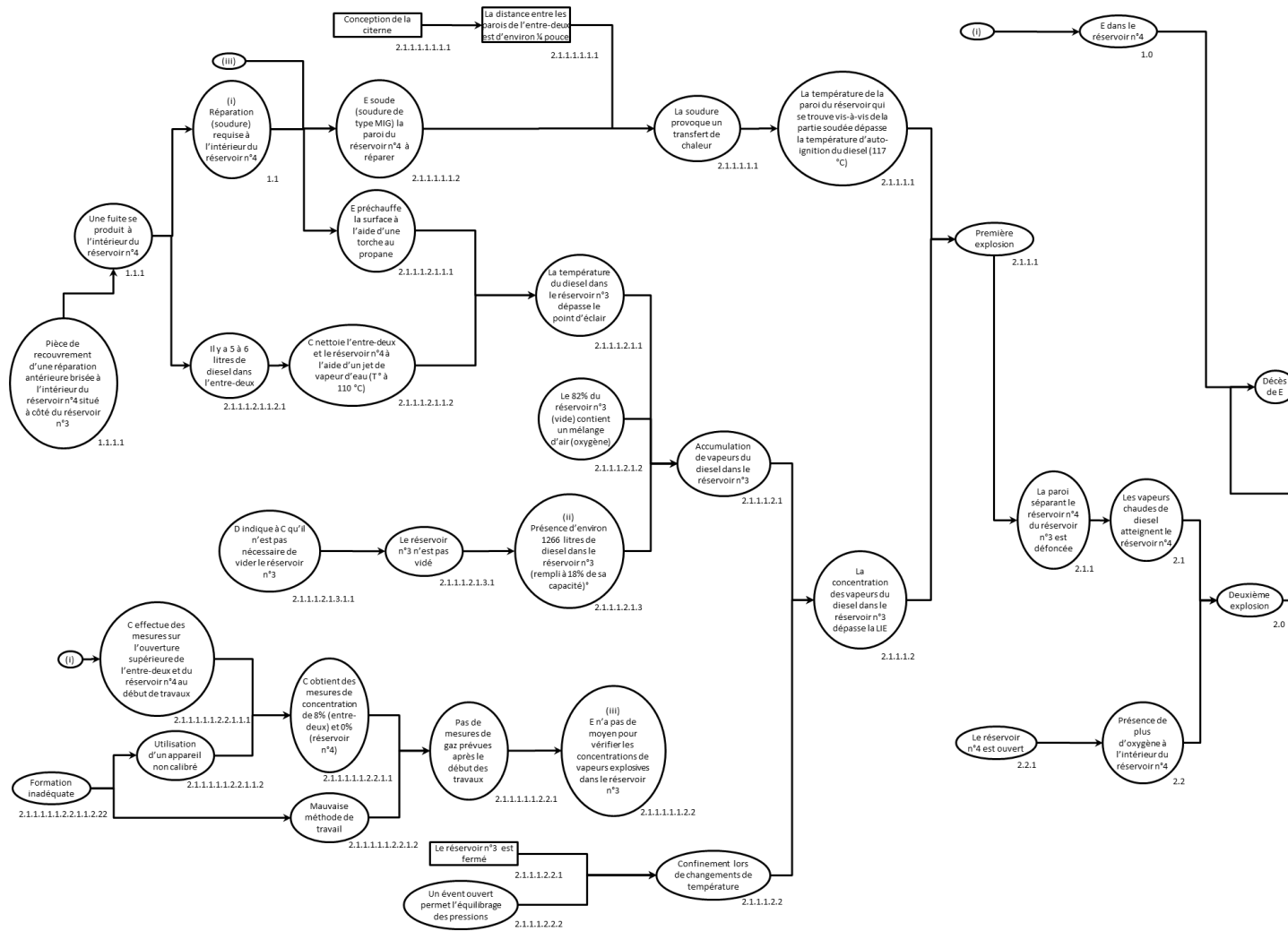
Les arbres des causes des cas B à J sont présentés de la figure 15 à la figure 23.

Figure 15. Arbre des causes du cas B (asphyxie ; cuve).



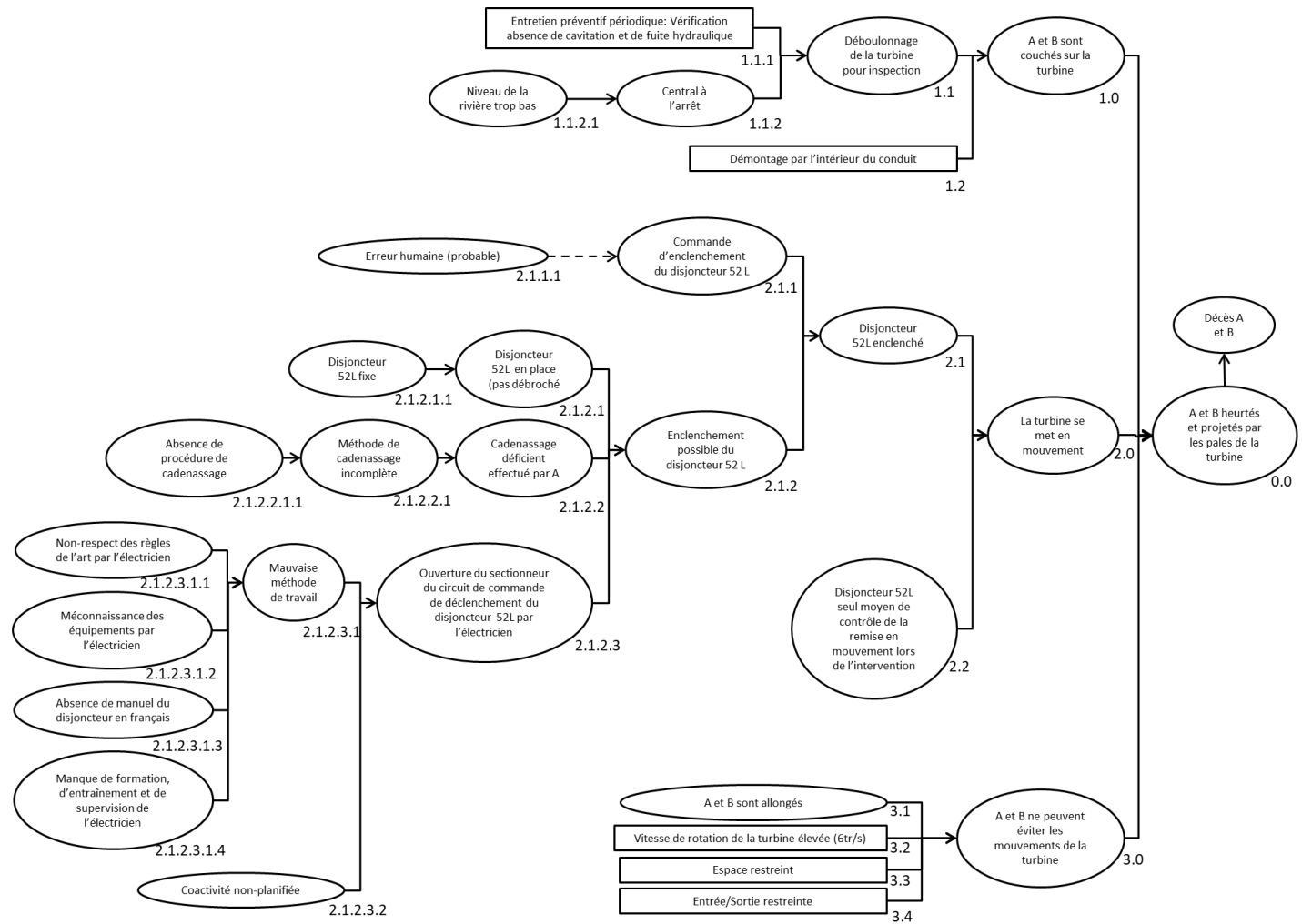
IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

Figure 16. Arbre des causes du cas C (explosion ; citerne).



IRSSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

Figure 17. Arbre des causes du cas D (coincé par ; turbine).



IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

Figure 18. Arbre des causes du cas E (coincé par ; mélangeur).

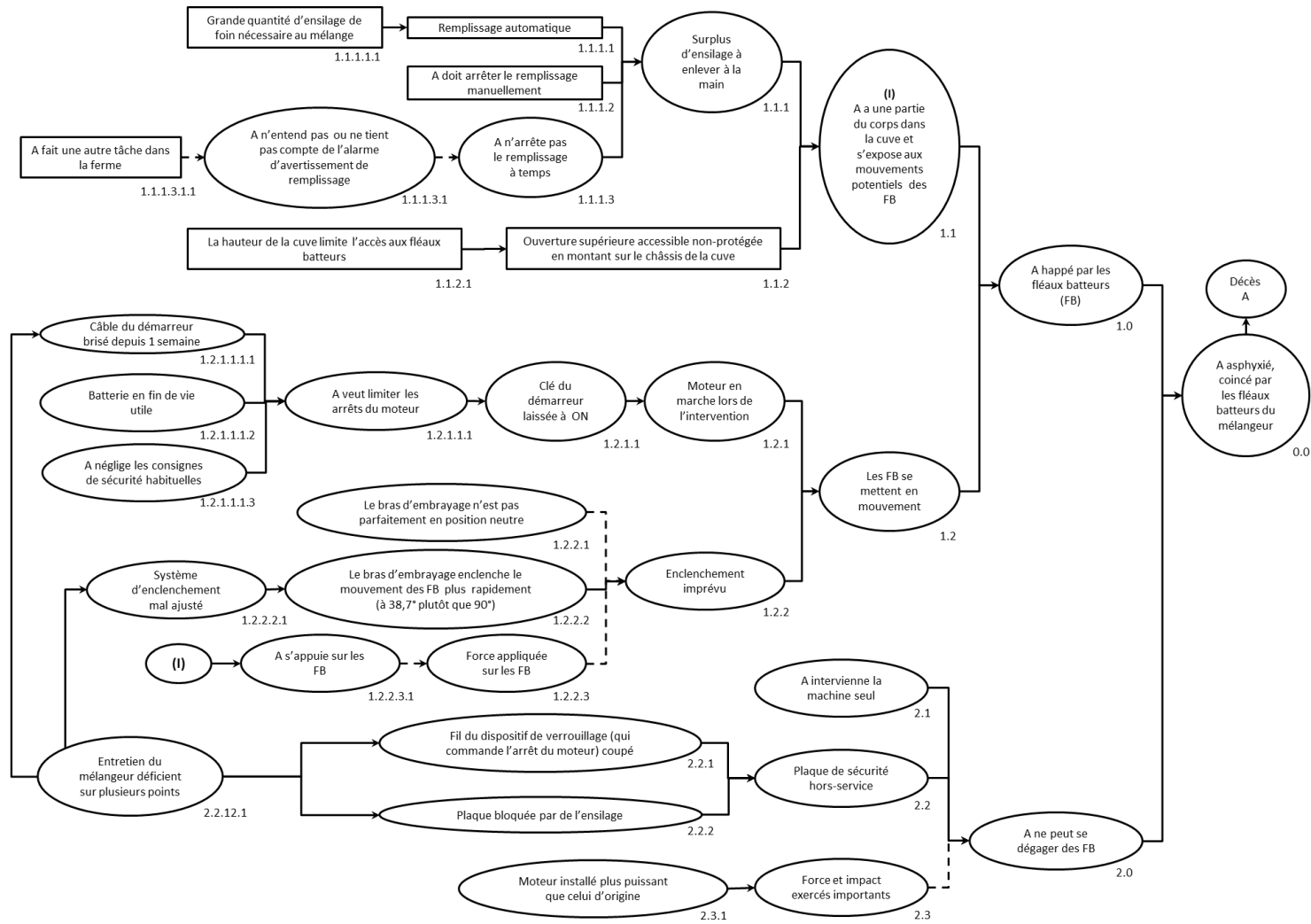
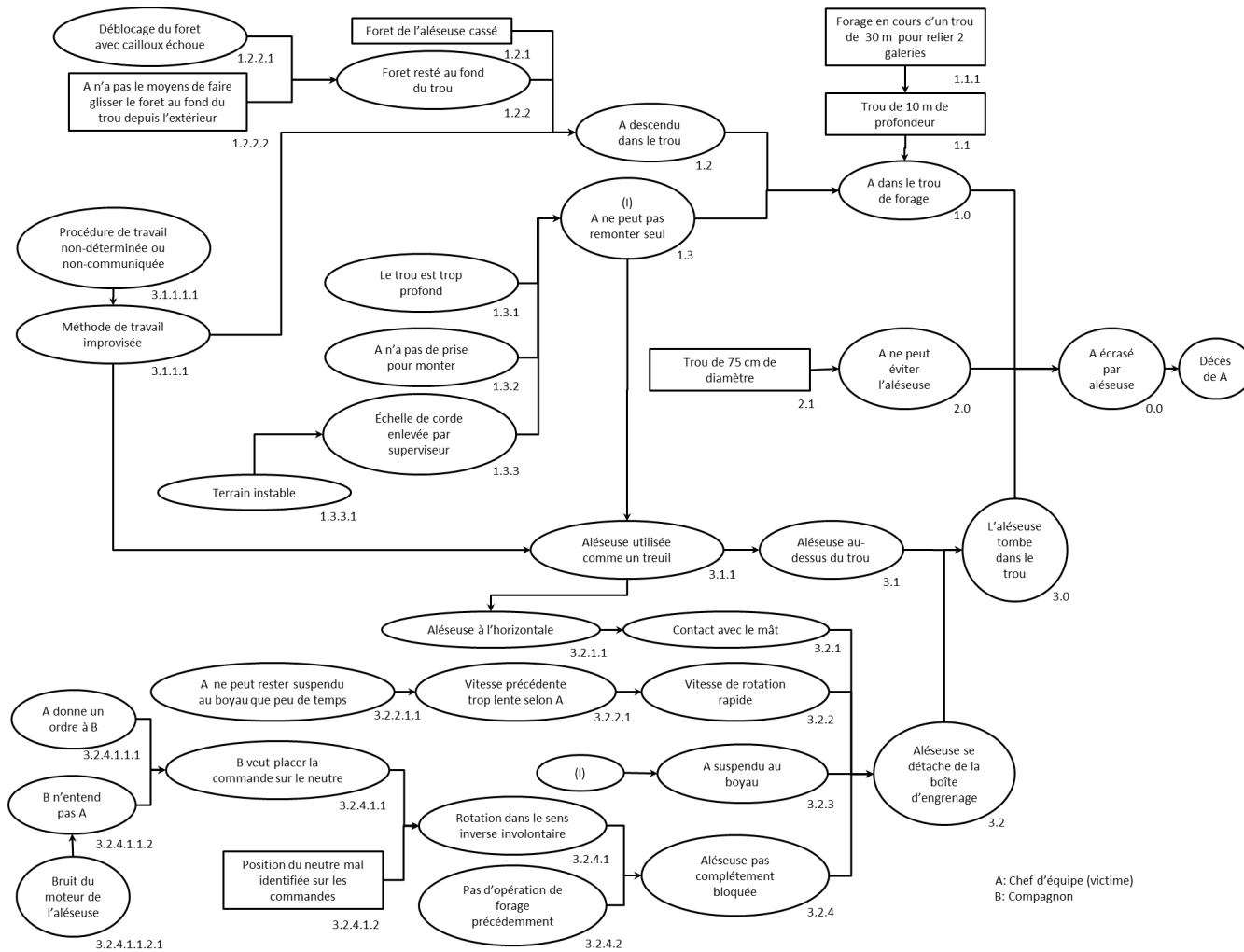


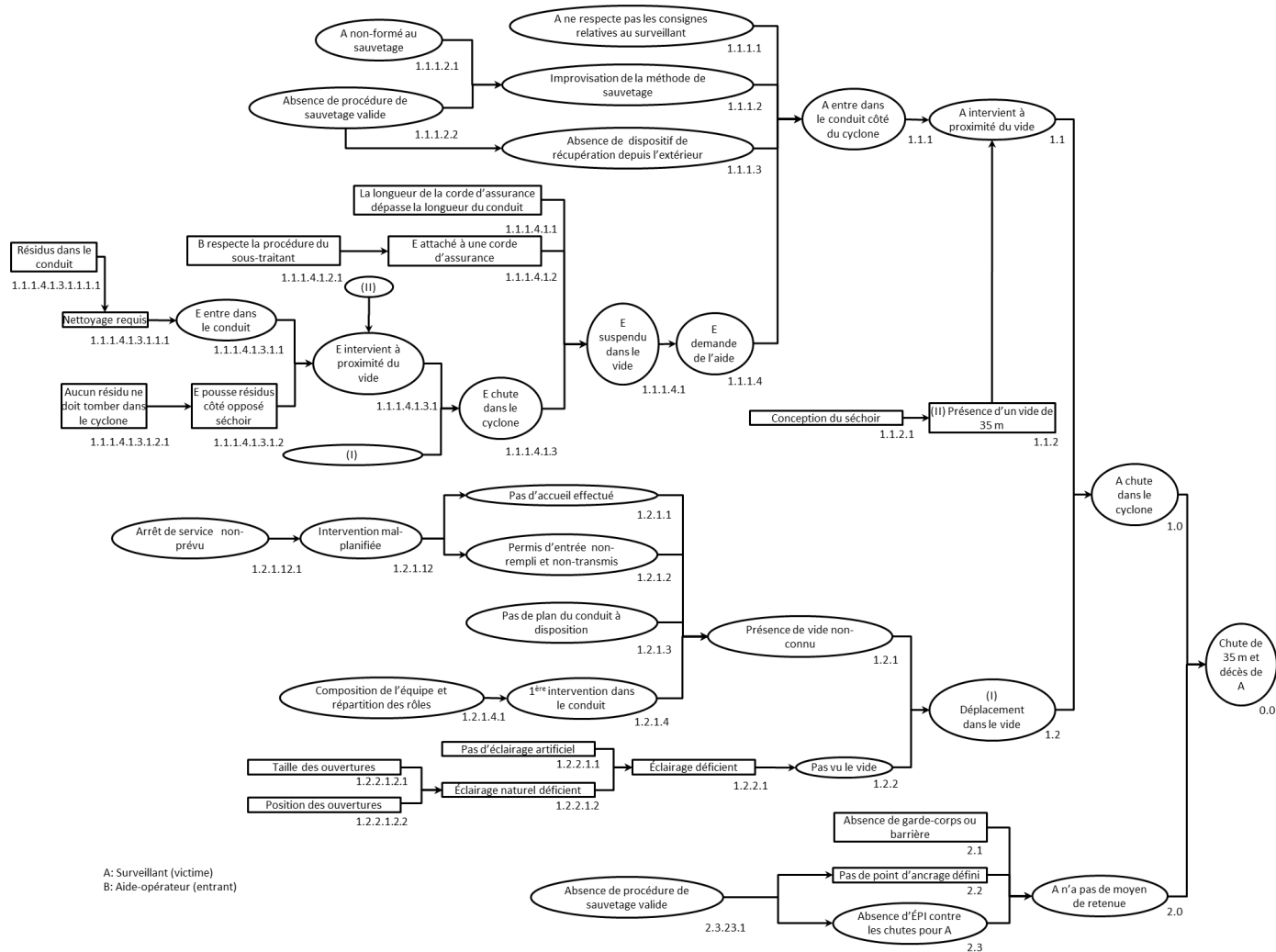
Figure 19. Arbre des causes du cas F (chute objet ; trou de forage).



A: Chef d'équipe (victime)
B: Compagnon

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

Figure 20. Arbre des causes du cas G (chute de hauteur ; séchoir).



IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

Figure 21. Arbre des causes du cas H (électrocution ; plénum).

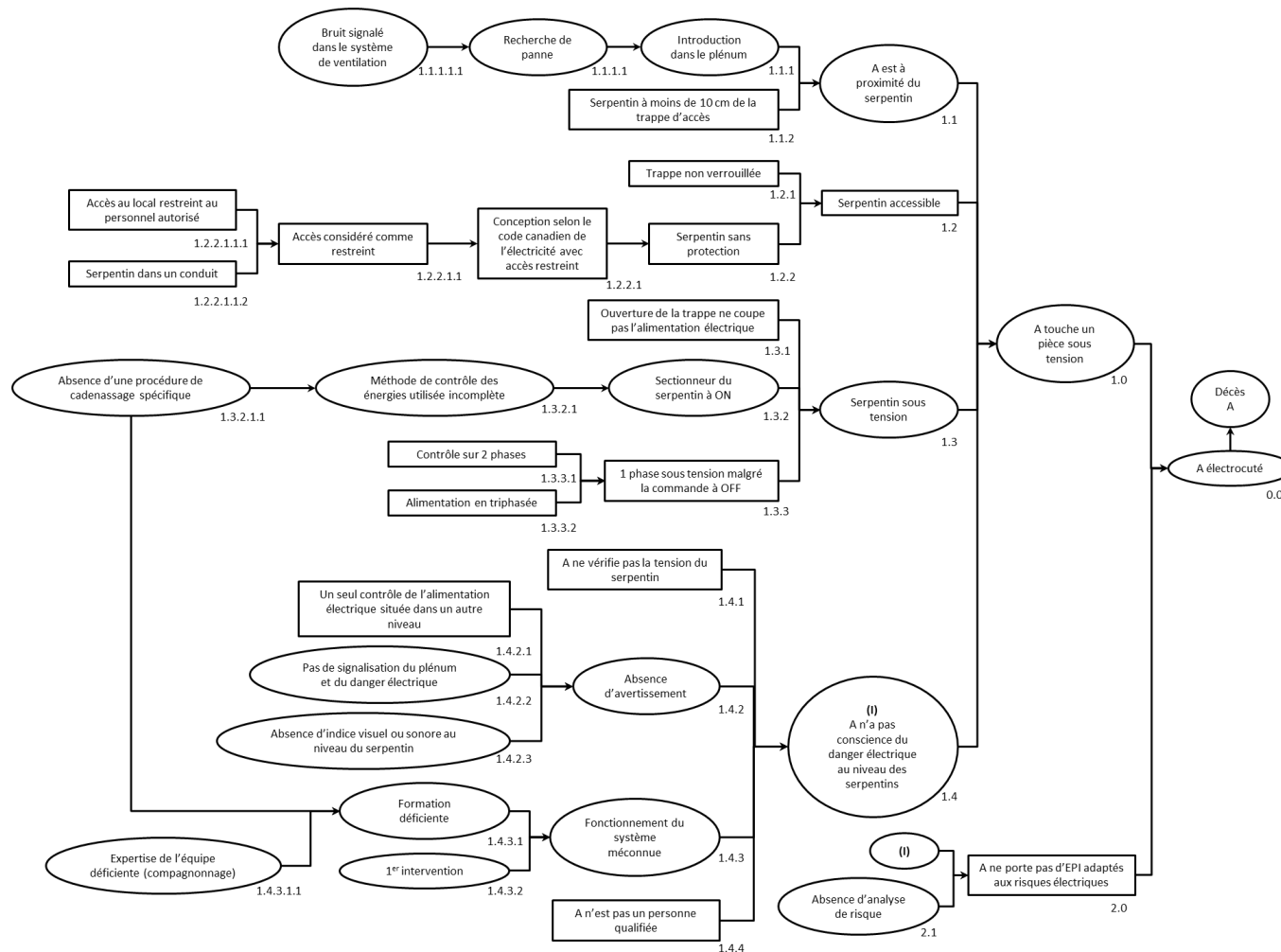


Figure 22. Arbre des causes du cas I (ensevelissement ; silo à grains).

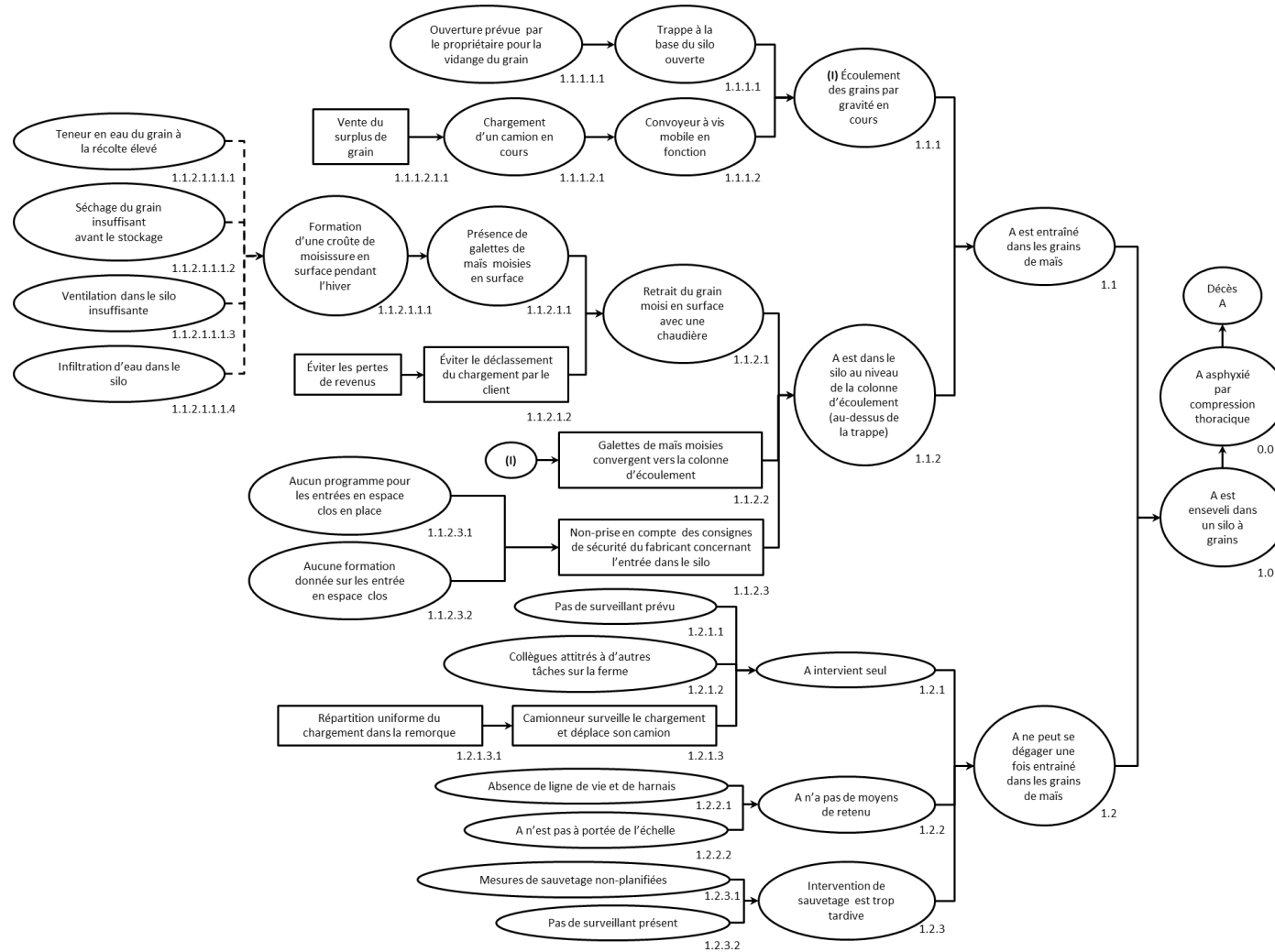
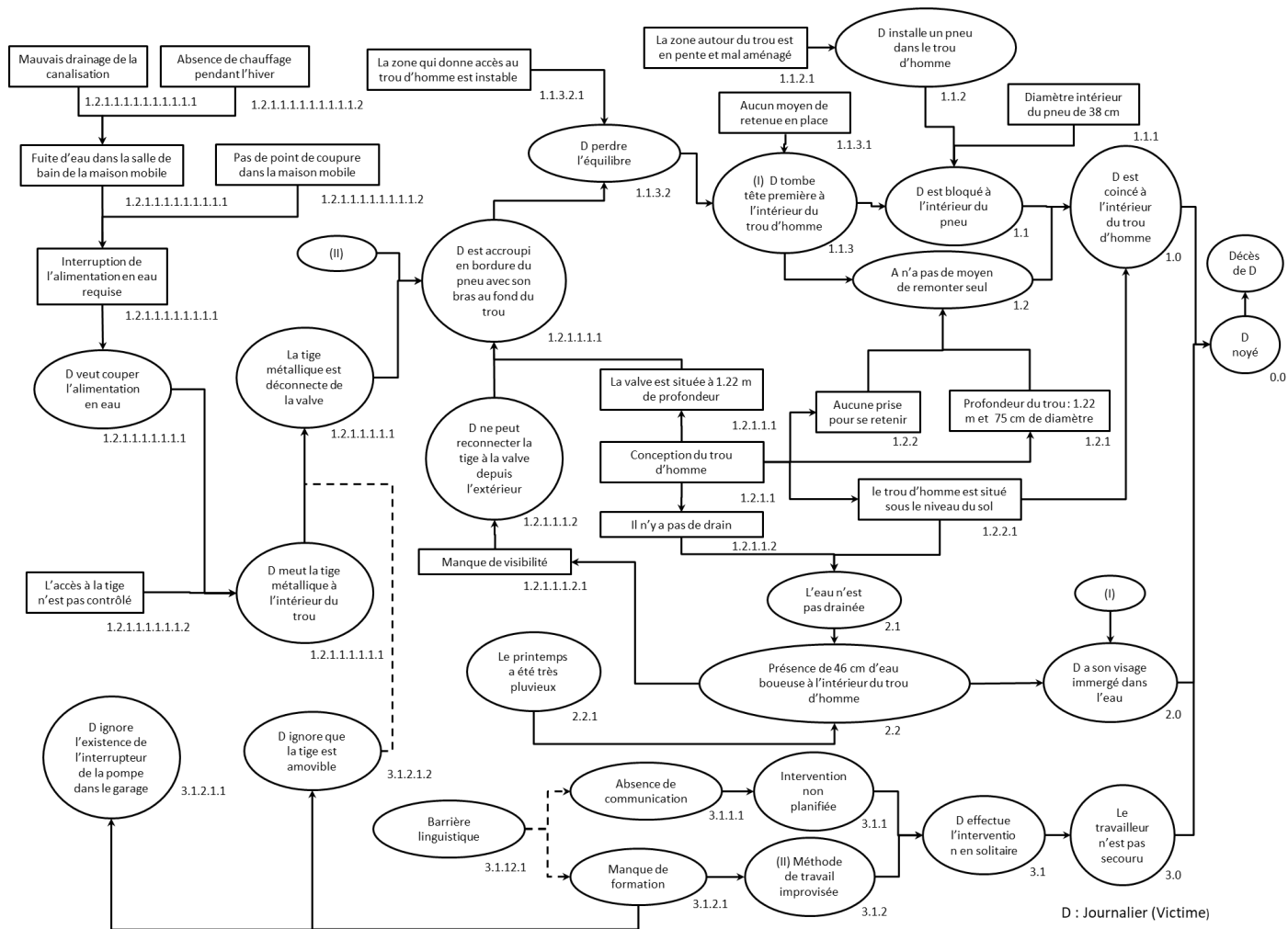


Figure 23. Arbre des causes du cas J (noyade ; trou d'homme).



ANNEXE D

D.I Base de connaissances : contraintes techniques et organisationnelles

Le tableau 24 présente le détail des principales contraintes techniques et organisationnelles exprimées lors des entrevues. Il ne s'agit pas d'une liste exhaustive des contraintes réelles. Le niveau de détails pour chaque solution dépend principalement des participants présents lors de chaque étude de cas.

Tableau 24. Détails des contraintes techniques et organisationnelles associées aux solutions de la base de connaissances

Sol_ID	Principe_ID	EC_ID	Int_ID	Sol_Nom	Tech_ID	Détails contraintes techniques	Org_ID	Détails contraintes organisationnelles
1	P1	1	AE	Poste électrique hors sol	T4	L'objectif est d'enterrer les câbles, ce serait un retour en arrière. L'aspect visuel serait dégradé (petit bâtiment de béton de 2x3 m tous les 150-200 m). De plus, il faut des terrains pour mettre ces locaux. Il y a trop d'infrastructures pour faire différemment aujourd'hui.	G6	Si attenant à un bâtiment privé, la question de l'accès se pose. Pour le moment, il n'a pas de problème de gestion d'accès. Le partage des puits d'accès à plusieurs usagers, c'est économique. Le modèle actuel fonctionne avec les contraintes des différents usagers (p. ex. risque électrique), ce qui n'est pas forcément le cas avec un local technique.
2	P1	1	AE	Galerie technique	T4	Prend beaucoup de place dans le souterrain. C'est une raison qui fait que c'est moins utilisé. Il faut que le souterrain le permette, ce qui n'est pas toujours le cas.	G6	Trouver une entente avec tous les usagers (électricité, gaz, eau, etc.) sur le partage et l'organisation de l'espace dans la galerie (p. ex. gestion des risques). Il s'agit d'un nouveau concept, difficile de synchroniser ce projet avec celui de réfection d'une rue.
3	P1	6	AE	Chambre de régulation de pression hors terre (hotbox)	T2	Gel des canalisations l'hiver. Pour cela, la chambre est chauffée avec une redondance. Il y a une alarme de basse température est fixée à 5°C et il y a toujours un écoulement et les conduites (8-12 po). On ne peut pas faire ça avec de petites conduites à cause du gel. Pas possible pour de très grosses conduites, nécessite de grandes chambres de régulation traditionnelles. Ajout de bollards pour assurer une protection pour les collisions de véhicules. L'ajout de bollard n'est pas toujours possible notamment lorsqu'ils créent un risque de collision plus grand. L'emprise au sol est relativement importante, on ne peut pas faire ça partout.	G6	Il faut que l'acceptabilité sociale soit là. En ville ou dans les quartiers résidentiels, on n'a pas la place. On met aussi une pellicule avec motif pour que le cabinet s'intègre bien à l'environnement. Ça permet aussi de se prémunir du vandalisme (p. ex. graffiti).
4	P2	6	AE	Chambre de régulation de pression prévue pour occupation	T4	Pas possible lors de réingénierie, mais sur une nouvelle chambre. Cela prend de la place pour mettre un escalier et faire la chambre plus grande.	G1	La contrainte est surtout budgétaire. On peut toutefois faire une économie d'échelle sur le développement en appliquant ce principe lors de tous les remplacements des postes en fin de vie.
5	P2	8	AE	Palier intermédiaire du poste de pompage prévu pour occupation	T4	Cela prend de la place pour mettre un escalier et une structure prévue pour occupation.	G1	La contrainte est surtout budgétaire. On peut toutefois faire une économie d'échelle sur le développement en appliquant ce principe lors de tous les remplacements des postes en fin de vie. Malgré les investissements, ne supprime pas les interventions en espace clos au fond du puits.

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

Sol_ID	Principe_ID	EC_ID	Int_ID	Sol_Nom	Tech_ID	Détails contraintes techniques	Org_ID	Détails contraintes organisationnelles
6	P3	1	VI	Caméra 360° pour l'inspection	T2	L'ouverture est au milieu du puits pour ne pas être juste au-dessus des câbles. On peut parfois être un peu loin de l'endroit souhaité. Si le puits est trop encombré, on est limité sur ce qu'on peut faire de l'extérieur. On ne peut pas utiliser la caméra, même thermique. Il faut faire un désencombrement.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
7	P3	16	AE	Pompes hydrauliques à l'extérieur du puits	T11	Modification nécessaire du système hydraulique de la machine presse.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
8	P4	6	VI	Livraison ouvrage filmée	T8	La qualité de l'image doit être suffisante pour ce genre d'inspection (livraison).	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
9	P4	8	IM	Flotte de niveau d'eau amovible	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
10	P4	8	IM	Sonde de niveau d'eau non immergée	T8	Moins fiable que les flottes. Elle doit donc être associée à 2-3 flottes (redondance), car ce système critique. Cela diminue l'efficacité de cette solution par rapport aux entrées.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
11	P4	8	IM	Fond du puits qui favorise l'absence d'accumulations	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
12	P4	1	IE	Bornes de raccordement à la base des lampadaires	T1	Faisable seulement lors du développement de nouveaux quartiers, car nécessite une architecture du réseau un peu différente.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
13	P4	1	RO	Puits d'accès électrique préfabriqué	T2	Fonctionne dans les cas où il n'y a pas encore de câbles présents (nouveau développement). Ça ne fonctionne pas dans le cas d'agrandissement de puits.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
14	P4	6	AE	Électrique/électronique à l'extérieur de la chambre de régulation de pression	T4	Nécessite une armoire sur ou à proximité de la voie publique.	G1	Coût un peu plus élevé.
15	P4	8	AE	Séparation des réseaux pluviale et sanitaire	T11	Infrastructure différente. Dans ce cas, les eaux du réseau sanitaire sont plus denses et il faut faire quelques changements techniques comme l'impulseur des pompes (plus du style déchiqueteur) et la modification des pentes.	G4	Possible, mais sur des zones limitées (notamment des nouveaux développements). Difficile sur de l'existant à cause de l'ampleur des travaux.
16	P4	8	IM	Système pour sortir les pompes submersibles du poste de pompage	T2	Un enjeu est qu'il faut que les trappes du palier intermédiaire soient ouvertes pour ne pas entrer du tout pour sortir la pompe. Ne supprime pas totalement l'entrée dans le fond du puits : inspection de la fixation du coude de décharge et du « facing » du raccord, inspection du béton, des barres guidées.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
17	P4	7	PR	Mesures depuis l'extérieur du poste	T2	Possible si la chambre de vanne est bien droite et la canalisation accessible Dépend de la configuration et des relevés à faire.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
18	P4	1	RO	Fibre de verre	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
19	P4	8	IM	Dégrillage en amont du poste de pompage	T12	Le fait d'ajouter un équipement dans l'espace clos n'est pas toujours une bonne solution en termes d'entretien.	G6	Ça passe surtout par la responsabilisation des citoyens pour diminuer les gros déchets à la source. La sensibilisation des citoyens a toutefois ses limites (p. ex. recyclage).
20	P4	8	IM	Surveillance des pompes immergées	T7	Il faudrait que la ville modernise sa télémétrie et ses modes opératoires.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
21	P5	8	AE	Palier intermédiaire dans le poste de pompage	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
22	P5	1	AE	Ajout d'une deuxième ouverture aux puits d'accès électriques	T2	Il faut lester le couvercle de cette 2 ^e ouverture, car sinon elle bouge au passage d'un bus.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
23	P5	1	AE	Socle permanent pour potence	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
24	P5	30	AE	Ancrage permanent pour puits d'accès, poste de pompage	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G6	Souvent, on est limité par le donneur d'ouvrage/client à cause des coûts. On va préférer différer les problèmes dans le temps.
25	P5	8	AE		T2	Milieu inhospitalier pour les ancrages	G3	Certification périodique

IRSSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

Sol_ID	Principe_ID	EC_ID	Int_ID	Sol_Nom	Tech_ID	Détails contraintes techniques	Org_ID	Détails contraintes organisationnelles
26	P5	6	AE	Trappe d'accès de grandes dimensions	T4	Problématique de la place sur l'espace public et de positionnement sur la voirie	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
27	P5	6	AE	Garde-corps permanents. Grille sous la trappe d'accès	T4	Pas toujours la place pour les garde-corps permanents. Les garde-corps qui se déploient lors de l'ouverture de la trappe pour gérer le risque de chute ne sont pas une bonne solution à long terme. Le système va finir par se dégrader avec le temps.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
28	P5	8	AE	Échelle droite	T7	Palier de repos nécessaire tous les 6 m.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
29	P5	1	AE	Protection contre la chute d'objets dans le puits d'accès électriques	T8	Résistance du système	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
30	P5	1	AE	Ligne de vie en kevlar pour les puits d'accès électriques	T1	Pas un équipement standard	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
31	P5	1	AE	Peinture des murs en blanc	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
32	P5	1	AE	Panier de récupération des seringues souillées	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
33	P5	8	AE	Points de coupure pour le poste de pompage	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
34	P5	8	IM	Redondance des pompes dans le poste de pompage	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
35	P1	5	AE	Suppression de l'antichambre	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
36	P3	23	II	Mesure par ultrason	T10	Changement de protocole, apprentissage d'une nouvelle technologie de mesure.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
37	P3	22	VI	Drone d'inspection ATEX	T12	En milieu ATEX, c'est plus complexe.	G2	Cela demande d'engager des firmes spécialisées ce qui a des coûts. Dépend du type d'inspection souhaitée.
38	P3	26	IM	Repositionnement des capteurs de pression	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
39	P3	28	UN	Filtrage du sable à l'extérieur	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
40	P4	15	VI	Caméra 360° pour l'inspection	T5	Pas utilisée en lieu et place d'une entrée en espace clos. Pour l'inspection, il faut entrer en général toucher. Utiliser plus pour la tuyauterie.	G1	À explorer pour un 1er diagnostic, pour voir si ça vaut la peine. Il faut voir le gain si de toute façon, il faut faire une entrée pour compléter le diagnostic ou réparer.
41	P4	15	VI	Caméra traditionnelle pour l'inspection	T2	La faisabilité dépend du cuvier et de l'accès, ça prend des équipements caméras spéciaux qui peuvent se contorsionner (utilisé dans le dock, mais ce n'est pas un espace clos).	G2	Pour des raisons de vitesse d'exécution et de coût, ils préfèrent y aller avec des trappes bien positionnées sans entrée que des caméras. En effet, l'utilisation de caméra est sous-traitée. Si la trappe n'est pas une solution, la caméra peut à ce moment être une option.
42	P4	12	VI		T5	Ça prend une bonne installation pour aller voir tous les recoins. Il faut aussi faire des mesures d'épaisseur des palettes et pour cela, il faut entrer.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
43	P4	27	UN	Ouvertures/trappes additionnelles pour inspection	T2	Ce n'est pas possible pour les séchoirs, car l'équipement est trop petit. Ce n'est pas toujours possible pour les cuiviers, car ils ne sont pas toujours à pression atmosphérique et il y a de la matière en de fermentation avec la création de H ₂ S (il faut donc les mettre le moins possible à l'atmosphère).	G1	Ces ouvertures sont prévues au départ sur les parties plus récentes de l'usine. Certaines ont été ajoutées sur des parties plus anciennes lorsque possible et « payant » (p. ex. entrée régulière).
44	P4	11	RW	Ouvertures pour faciliter la réparation de citerne	T12	Une partie du corps doit pénétrer dans la citerne (p. ex. : bras, tête). On installe un extracteur d'air par l'ouverture sur le toit et un apport d'air à l'entrée, détection de gaz, et surveillant.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
45	P4	14	MR	Fond du réservoir qui favorise l'écoulement	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G1	Coûts de modification élevés. Pb de rentabilité.
46	P4	5	IM	Brassage des boues avec des biogaz	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)

IRSSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

Sol_ID	Principe_ID	EC_ID	Int_ID	Sol_Norm	Tech_ID	Détails contraintes techniques	Org_ID	Détails contraintes organisationnelles
47	P4	5	AE	Tuyauterie permanente jusqu'à l'extérieur	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
48	P4	12	IM	Design des palettes (bétonnière)	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G4	Compromis entre efficacité (on limite l'accumulation de béton) et sécurité (le béton ne se décroche pas trop facilement).
49	P4	14	PW	Jet 360° à l'eau tiède pour nettoyage	T7	Nouvelles installations nécessaires pour apporter de l'eau tiède.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
50	P4	15	PW		T5	À cause de la taille de l'espace, de la nature et de la quantité de résidus, il faut toujours entrer pour finir le pompage des résidus. Plus difficile de nettoyer si l'entrée est en bas plutôt qu'en haut.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
51	P4	12	MR	Produit pour aider à dissoudre le béton	T10	Manque d'information sur l'efficacité réelle du produit	G1	Rentabilité d'une telle solution qui nécessiterait beaucoup de temps
52	P4	23	RO	Fibre de verre	T9	Réservoir en un seul morceau, ça limite le remplacement de certains réservoirs	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
53	P4	15	MR	Revêtement des parois des cuiviers	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
54	P4	14	MR	Filtrage en amont par centrifugation	T10	On ne veut pas trop filtrer la liqueur non plus, car c'est un entrant pour la chaudière.	G1	Pas d'investissement de réingénierie. Pb de coûts et de rentabilité.
55	P4	14	MR	Agitateur au fond réservoir	T10	L'ingénierie n'a jamais été effectuée sur ce type de liquide donc pas sûr de la complexité de l'installation.	G1	Pas d'investissement de réingénierie. Pb de coûts et de rentabilité.
56	P4	14	MR	Amélioration du procédé en amont	T11	Gros travaux.	G1	Gros investissement, mais fait, car sur un équipement important pour la productivité de l'usine.
57	P4	12	MR	Rinçage quotidien	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G6	Contraintes de temps, dépend du niveau de conscientisation du chauffeur (ce n'est pas lui qui fait les entrées).
58	P4	12	MR	Préparation béton moins collante (bétonnière)	T1	Le <i>dry batch</i> (mélange dans la boule) peut coller un peu plus que du prémix (mélange préparé en usine). Ça dépend de la façon dont le dry batch est préparé et de la poudre utilisée ; le prémix est plus constant. Le béton haute résistance (45 MPA) est plus collant.	G6	Le type de béton dépend des demandes techniques du client, des conditions climatiques (température) et de la distance à parcourir.
59	P5	26	AE	Ouverture en bas du réservoir	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
60	P5	15	IM	Entrée en bas du réservoir (déclassement)	T2	Parfois, on ne peut pas ajouter des portes en bas à cause de la structure (p. ex. réservoir en fibre de verre).	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
61	P5	23	AE		T6	On peut utiliser la porte en bas si le réservoir est vide, parfois entrée en espace clos nécessaire avant de pouvoir utiliser cette porte. Ajout d'une porte peut créer des turbulences non voulues dans le réservoir (créé une réaction exothermique).	G8	Si le réservoir est sous garantie, on ne peut pas le modifier.
62	P5	22	RO		T3	C'est possible de le faire dans le certain cas de réservoir hors terre, mais pas pour les infrastructures souterraines, aériennes, sous pression ou avec des spécifications spéciales (p. ex. médical).	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
63	P5	12	AE	Passerelle pour l'accès à l'entrée	T7	Nécessite le développement d'un équipement interne. Pourrait être fourni avec l'équipement.	G5	Pas disponible à l'achat
64	P5	12	AE	Protection sur le pourtour de l'entrée horizontale	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
65	P5	13	AE	Potence transportable par chariot élévateur	T6	Cette structure doit être mobile, car il peut y avoir 10 places dans l'usine où on intervient. Cela prend toutefois un ancrage certifié au sol à chaque endroit, possiblement plusieurs potences s'il y a plusieurs interventions en même temps. Il faut une flexibilité opérationnelle pour que ça marche. On ne peut pas avoir un portail fixe par exemple.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)

IRSSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

Sol_ID	Principe_ID	EC_ID	Int_ID	Sol_Nom	Tech_ID	Détails contraintes techniques	Org_ID	Détails contraintes organisationnelles
66	P5	13	AE	Plateforme sur mesure pour intérieur de citerne	T2	Il faut que ça passe dans le trou d'homme. Si en 3 pièces, il ne faut pas que ce soit long à monter. La forme ronde des parois est un défi pour que ce soit stable.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
67	P5	12	AE	Sable au fond de la boule de la bétonnière	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G5	Il faut avoir accès à du sable. Prend du temps pour ajouter du sable.
68	P5	5	AE	Trappes additionnelles sur le toit	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
69	P5	12	AE	Immobilisation de la bétonnière et de la boule	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G5	S'assurer à l'achat d'avoir un coupe-batterie cadenassable et un mécanisme de blocage de la boule sécuritaire.
70	P5	13	AE	Dispositif de purge pour la citerne	T7	Cela prend une installation spéciale pour récupérer les résidus et introduire l'eau et l'air.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
71	P5	12	IM	Remplacement palettes (boule bétonnière)	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G3	Anticiper le remplacement des palettes (utiliser les mesures annuelles).
72	P1	3	AE	Système de filtration de l'eau en continu	T11	Modification complète du processus	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
73	P3	4	VI	Caméra 360° pour l'inspection	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
74	P3	2	VI		T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
75	P3	25	VI	Drone d'inspection	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G1	On préfère déclasser l'espace, c'est moins d'investissement.
76	P3	2	VI	Sous-marin télécommandé	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G2	Fait appel à un sous-traitant.
77	P3	9	PW	Station de nettoyage automatisé pour wagon	T11	Modification du processus et des équipements	G4	Pour l'automatisation, c'est beaucoup d'investissement pour que ça soit efficace.
78	P3	25	PW	Nettoyage automatisé	T11	Modification du processus et des équipements	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
79	P3	2	IM	Système pour sortir les pompes submersibles du bassin	T2	Il a fallu travailler sur les rails pour qu'ils ne rouillent pas. Faire en sorte que les capteurs remontent avec la pompe. Intégrer de la tuyauterie flexible et des connexions solides pour la mobilité.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
80	P4	25	PW	Perche vacuum depuis l'extérieur	T5	Les débris au fond du bassin et au niveau de la pompe de soutirage ne peuvent être gérés depuis l'extérieur ainsi.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
81	P4	25	MR	Perche avec pince depuis l'extérieur	T8	Perche fonctionne, mais pas tout le temps. Cela dépend de la position de la pièce au fond.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
82	P4	4	AE	Dégrillage en amont	T8	Trouver un équilibre entre filtration des déchets et gestion du débit et du niveau dans les bassins en amont	G1	Investissements en ressources financières et humaines sans retombées instantanées
83	P4	4	PW	Vis sans fin au fond du bassin	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
84	P4	24	MR	Grattoir	T8	Dans le procédé, système mécanique pour empêcher la formation d'une croûte trop épaisse sur les parois (grattoir).	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
85	P4	4	AE	Aspiration des aérosols à la source	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
86	P4	25	RO	Matériaux plus résistants aux produits chimiques utilisés	T10	Trouver les pièces, matériaux, revêtements qui conviennent au contexte de production.	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
87	P4	25	PW	Buse d'air pour le brassage des résidus	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
88	P5	4	PW	Trottoir au fond du bassin (dessableur)	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
89	P5	4	AE	Accessibilité des rampes d'aération (dessableur)	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
90	P5	9	PW	Ajout escalier amovible	T9	Gestion de la mobilité de l'escalier	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
91	P5	10	PW	Points d'ancrage et socles de	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
92	P5	25	AE	potence permanents	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
93	P5	4	AE	Trappes d'accès en 2 étapes	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective

Sol_ID	Principe_ID	EC_ID	Int_ID	Sol_Nom	Tech_ID	Détails contraintes techniques	Org_ID	Détails contraintes organisationnelles
94	P5	4	AE	Poutre et un palan pour manutention	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
95	P5	4	AE	Redondance des installations	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
96	P3	20	VI	Drone d'inspection	T2	Il peut y avoir des difficultés à cause de la poussière générée par les pales du drone.	G2	Cela demande d'engager des firmes spécialisées, ce qui a des coûts (permis spéciaux, obligations de certifications).
							G7	Il faut des conditions climatiques favorables (peu de vent).
97	P5	21	AE	Système d'échelle temporaire rigide	T1	Projet d'ingénierie.	G1	Rentabilité difficile à justifier en réingénierie ou en extra
98	P5	21	AE	Aménagement des entrées	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G1	Rentabilité difficile à justifier en réingénierie ou en extra
99	P5	21	AE	Chaise manutentionnée par une potence	T1	Validation par calcul sur la solidité de la structure	G4	Demande des discussions avec les entrepreneurs en jet de sable afin de trouver une solution viable pour permettre l'exécution des travaux dans un délai très court.
100	P3	18	VI	Caméras d'inspection spécialisées pour fournaise	T2	Nécessite un équipement spécialisé pour l'environnement difficile	G2	Nécessite l'utilisation de sous-traitants spécialisés
101	P3	18	PW	Ouverture pour un nettoyage depuis l'extérieur de la chaudière	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
102	P3	18	VI	Regards d'inspection	T0	(Aucune contrainte mentionnée)	G0	(Aucune contrainte mentionnée)
103	P4	17	MR	Charges explosives	T12	Gestion de l'explosion pour ne pas provoquer de dégâts matériels et humains	G2	Opération sous-traitée
104	P4	18	RW	Reconception de pièces critiques de la chaudière	T2	Complexité du processus à l'intérieur	G4	Compatibilité et amélioration du processus
105	P4	29	RE	Modification de la chute du convoyeur de fosse	T11	Localiser la chute des copeaux demande des modifications importantes, présence d'huile de coupe, copeaux métalliques coupants, profondeur du convoyeur	G1	Relation coût-rentabilité
106	P5	19	AE	Ajout de brides à la chambre de combustion	T2	Modifications limitées à cause des contraintes structurelles et thermiques.	G1	Rentabilité difficile à justifier en réingénierie ou en extra, car il y a toujours des entrées en espace clos à gérer
107	P5	19	AE	Grandes ouvertures permanentes boulonnées	T2	Pour rendre ces ouvertures permanentes, il s'agit d'un projet d'ingénierie. Il faut que l'équipement le permette (p. ex. : absence de membrures structurales ; pas sous pression et certification). Ajouter un cadre pour encastrer la porte pour que la structure résiste. Il faut que ça résiste aux contraintes thermiques.	G1	Rentabilité difficile à justifier en réingénierie ou en extra, car il y a toujours des entrées en espace clos à gérer
108	P5	19	AE	Taille minimum des entrées	T2	Modifications limitées à cause des contraintes structurelles et thermiques.	G1	Rentabilité difficile à justifier en réingénierie ou en extra, car il y a toujours des entrées en espace clos à gérer
109	P5	18	AE	Design des entrées des chaudières	T2	Modifications limitées à cause des contraintes structurelles et thermiques.	G1	Rentabilité difficile à justifier en réingénierie ou en extra, car il y a toujours des entrées en espace clos à gérer
110	P5	18	AE	Aide à l'entrée	T4	Ils ont souvent besoin de la place autour (nettoyage, brûleur...), il ne faut pas que la plateforme nuise à cela. Il faut penser que la chaudière prend de l'expansion en chauffant. Il ne faut donc pas se fixer à la structure.	G6	À l'heure actuelle, ce n'est pas souvent installé de façon permanente à cause de l'opération.
111	P5	18	RW	Faux plancher dans ballon de fournaise	T0		G0	(Aucune contrainte mentionnée)
112	P5	18	AE	Ventilation par le procédé	T6	Ne fonctionne pas si le ventilateur ou des volets sont en maintenance	G0	(Aucune contrainte mentionnée)

IRSST ■ Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective