

CIGI QUALITA MOSIM 2023

Réduction des risques à la conception dans les milieux de travail : le cas des espaces clos

DAMIEN BURLET-VIENNEY¹, ANDRES GONZALES CORTES², YUVIN CHINNIH², ALI BAHLOUL¹, ABDALLAH BEN MOSBAH², CAPUCINE OUELLET¹

¹ IRSST (Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail)
505, boul. de Maisonneuve O., Montréal, QC, H3A 3C2, Canada
damien.burletvienney@irsst.qc.ca
ali.bahloul@irsst.qc.ca
capucine.ouellet@irsst.qc.ca

² ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL
2500, Chemin de Polytechnique, Montréal, QC, H3T 1J4, Canada
andres-felipe.gonzalez-cortes@polymtl.ca
yuvn.chinniah@polymtl.ca
abdallah.ben-mosbah@polymtl.ca

Résumé – Les travailleurs qui doivent intervenir en espace clos sont potentiellement exposés à des risques élevés à cause du confinement, de la ventilation naturelle déficiente, du travail isolé, et des difficultés d'accès, de sauvetage et de communication. Bien que privilégiée dans les normes, la mise en place de mesures à la conception semble encore marginale dans les milieux de travail pour les interventions en espace clos. Les bonnes pratiques existent (ex. experts), mais sont dispersées. Dans cette perspective, une base de connaissances incluant une centaine des mesures applicables à la conception des espaces clos a été développée en s'appuyant sur l'analyse a posteriori d'accidents mortels, la rencontre d'experts en gestion des espaces clos et 19 études de cas en entreprise. Cet article présente les grandes lignes de la base de connaissances incluant une dizaine de principes associés à la conception des espaces clos. Les solutions énoncées étant associées à un contexte spécifique, les connaissances développées doivent être vues par les concepteurs et les exploitants d'espaces clos comme une base de réflexion à adapter à l'activité de travail ciblée. Les lacunes récurrentes lors du processus de conception des espaces clos sont également abordées.

Abstract – Workers who must intervene in confined spaces are potentially exposed to high risks due to confinement, poor natural ventilation, isolated work, and difficulties of access, rescue and communication. Although favored in standards, the implementation of measures at the design stage of confined spaces still seems marginal in workplaces in this context. Good practices exist (e.g. experts) but are dispersed. With this in mind, a knowledge base including about one hundred solutions applicable to the design stage of confined spaces was developed based on the analysis of fatal accidents, the consultation of experts and 19 case studies in companies. This article outlines the knowledge base, including ten principles associated with confined space design. As the proposed solutions are context-specific, designers and owners of confined spaces should consider this knowledge as a starting point to be adapted to the targeted work activity. Recurring deficiencies in the confined space design process are also discussed.

Mots clés – espace clos, réduction du risque, prévention intrinsèque, santé et sécurité du travail

Keywords – confined space, risk reduction, inherently safer design, occupational health and safety

1 MISE EN CONTEXTE

1.1 Privilégier la réduction du risque à la conception

En santé et en sécurité du travail (SST), 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]. Dans la norme ANSI/ASSE Z590.3-2011, un risque acceptable est lié au concept de *As Low As Reasonably Practicable* (ALARP; aussi faible qu'il est raisonnable

d'atteindre) [American National Standards Institute/American Society of Safety Engineers (ANSI & ASSE), 2011]. Ce concept fait référence au fait que le niveau de risque est acceptable lorsqu'il ne peut être abaissé davantage que par une augmentation des dépenses en ressources disproportionnée par rapport à la diminution du risque qui en résulterait. La norme ISO 12100 définit aussi une « réduction du risque adéquate » [International Organization for Standardization (ISO), 2010]. La norme ANSI/ASSE Z590.3-2011 est spécifique sur la prévention intrinsèque, aussi nommée *Prevention through Design* (PtD) [ANSI & ASSE, 2011]. 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]. La réduction du risque à la conception est à mettre en lien avec la hiérarchie des moyens de réduction du risque (Figure 1) [ISO, 2010]. L'élimination du danger, sa substitution ou encore l'utilisation de contrôles techniques sont traditionnellement considérées comme les moyens les plus efficaces [Rayner Brown *et al.*, 2021 ; Athar *et al.*, 2019]. Toutefois, un nombre considérable d'articles a mis en évidence que la réduction du risque à la conception n'est pas suffisamment adoptée [Pasman et Fabiano, 2021 ; Windapo *et al.*, 2014].

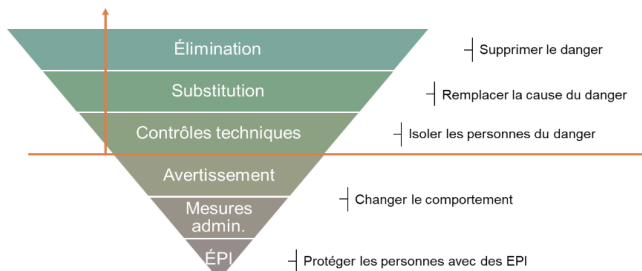


Figure 1. Hiérarchie des mesures de prévention en gestion des risques en SST

1.2 Cas du travail en espace clos

Le cas des interventions en espace clos (espace confiné en France) est une situation particulièrement pertinente pour la question de la réduction du risque à la conception, car les risques 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 [Association canadienne de normalisation (CSA), 2016]. L'approche privilégiée par l'équipe de recherche est de considérer un espace clos comme une machine industrielle afin d'y appliquer les principes d'analyse et de réduction du risque tels qu'énoncés dans la norme ISO 12100 en sécurité des machines [ISO, 2010]. Un outil d'analyse du risque spécifique aux espaces clos, E.CLOS (www.irsst.qc.ca/eclos), a d'ailleurs été développé dans un précédent projet [Chinniah *et al.*, 2016]. Les espaces clos parmi les plus courants dans les milieux de travail sont les réservoirs, les cuves, les puits d'accès, les égouts, les tuyaux et les citernes (RLRQ c. S-2.1, r. 13). Les entrées en espace clos sont effectuées, entre autres, pour des raisons de maintenance au sens large (ex. réparation, inspection, nettoyage, déblocage). Sur la période 1998-2017 dans la province du Québec, une moyenne de 2,6 décès par an a été dénombrée, soit environ 4 % des décès causés par un accident du travail [González Cortés *et al.*, 2021a]. Les gains à travailler à la conception, en évitant par exemple de créer un espace clos, sont donc potentiellement très importants.

Actuellement, la réduction des risques lors des interventions en espace clos s'effectue traditionnellement par l'émission de permis d'entrée, une ventilation mécanique temporaire, la mesure des gaz et l'utilisation d'équipements de protection individuelle (EPI) (RLRQ c. S-2.1, r. 13). Bien que privilégiée dans les normes et potentiellement plus efficace, la mise en place de mesures à la conception des espaces clos semble encore marginale dans les organisations [Chinniah *et al.*, 2016]. Cela peut s'expliquer a priori par : 1) l'anticipation d'un travail d'innovation coûteux et peu applicable, 2) une approche coût/bénéfice à court terme, 3) le manque de connaissances et d'expérience sur la mise en place de telles mesures et 4) l'habitude de procéder avec des moyens temporaires (ex. EPI)

[Gupta et Edwards, 2002]. Par exemple, l'utilisation de logiciels de modélisation humaine numérique (*Digital Human Modeling* (DHM) en anglais) qui ont montré leur potentiel pour simuler efficacement des conceptions alternatives, notamment en SST [Chaffin, 2008 ; Gordillo Paneque, 2019 ; Paul *et al.*, 2021 ; Schall *et al.*, 2018], ne semble pas avoir encore été explorée pour la problématique des espaces clos.

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 [CSA, 2016 ; Standards Australia, 2009 ; ANSI & ASSE, 2016]. Quelques études scientifiques ont abordé l'utilisation de la robotique pour effectuer certaines tâches d'inspection notamment (ex. drone, petit robot) [Botti *et al.*, 2016 ; Alsayed *et al.*, 2021].

Ainsi, les informations sur la prévention intrinsèque dans le contexte des espaces clos restent imprécises dans le sens où peu d'informations sur leur mise en œuvre réelle, leurs modalités d'utilisation ou leurs limites techniques sont structurées. Les connaissances existent (ex. experts, entreprises), mais elles ne sont pas regroupées et partagées.

1.3 Objectif

Afin de pallier ce manque d'information disponible sur la mise en œuvre de la réduction du risque à la conception pour le travail en espace clos, un projet de recherche a eu pour objectif de développer une base de connaissances avec des mesures concrètes correspondant aux trois plus hauts échelons de la hiérarchie de réduction du risque (Figure 1). Ces mesures ont été regroupées sous le terme « prévention intrinsèque et protection collective » (PIPC). Plus spécifiquement, cet article présente comment l'information a été regroupée et structurée pour créer la base de connaissances (section 2), puis décrit les lacunes de conception ainsi que les principes de réduction du risque issus de l'étude (section 3). Les résultats s'appliquent autant aux nouveaux espaces clos qu'à ceux existants.

2 METHODOLOGIE

2.1 Construction de la base de connaissances

Une méthodologie en trois phases a été utilisée afin de bâtir la base de connaissances sur les mesures de PIPC en lien avec les espaces clos (Figure 2). Cette approche a permis une triangulation de différentes sources de données (ex. accidents, littérature, entrevues, études de cas) [Carter *et al.*, 2014].

L'analyse a posteriori d'accidents mortels en espace clos a permis d'identifier certaines problématiques en lien avec la conception des espaces clos et démontrer le potentiel des mesures de PIPC dans ce contexte.

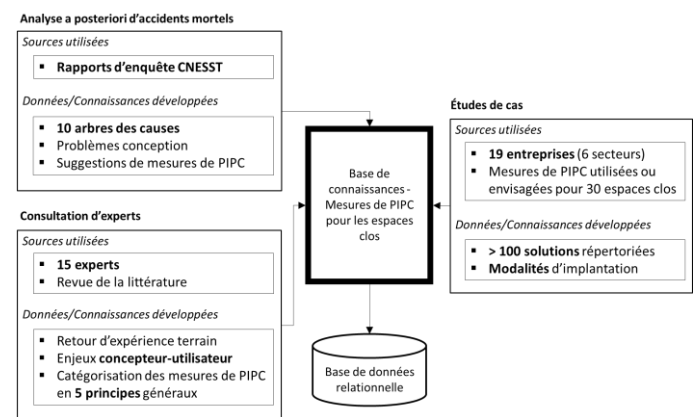


Figure 2. Construction de la base de connaissances sur les mesures de PIPC pour les interventions en espace clos

La consultation d'experts en gestion des espaces clos a permis de collecter des connaissances issues du terrain sur l'implantation et l'utilisation de telles mesures. Enfin, les études de cas en entreprise ont permis de recenser une banque de mesures utilisées ou qui pourraient l'être pour des interventions réelles ciblées. Une base de données a finalement été développée en utilisant les connaissances acquises lors des différentes phases. Les principaux éléments méthodologiques associés à chacune de ces phases sont présentés dans les sous-sections qui suivent.

Tous les participants ont pris part à cette recherche sur une base volontaire et non rémunérée. Une approbation éthique a été obtenue du comité d'éthique de la recherche de Polytechnique Montréal (CÉR-1617-71).

2.2 Analyse a posteriori d'accidents mortels

Dans un premier temps, le portrait des accidents mortels en espace clos au Québec a été mis à jour pour la période 2012-2017 en utilisant la base de données publique de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de sécurité du travail (CNESST). En associant ce travail à celui de Chinniah *et al.* [2016], un total de 44 rapports d'accident pour 53 décès a été recensé sur la période 1998-2017. Ce sont les statistiques énoncées à la section 1.2. Parmi cet échantillon d'accidents mortels, dix rapports ont été sélectionnés et analysés 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 conception dans ces situations [Leplat, 1978]. La constitution de l'échantillon devait d'abord refléter la distribution des décès par type d'accidents avec dans l'ordre les risques atmosphériques (intoxication, asphyxie, explosion), les risques mécaniques (coincé par) et enfin les risques physiques (ensevelissement, noyade, chute et électrocution) (Tableau 1). Chaque AdC construit a été validé de manière itérative par deux autres membres de l'équipe et un consultant.

2.3 Consultation d'experts

Par la suite, une quinzaine d'experts sur la gestion des risques en espace clos ont été consultés sous la forme d'une entrevue semi-dirigée de deux heures maximum sur leur lieu de travail (Tableau 2). L'objectif était de recueillir leurs connaissances sur les moyens de prévention à la conception, les enjeux d'implantation ou encore la relation utilisateur-concepteur. Un codage ouvert a été utilisé afin d'exprimer des données sous forme de concepts [Böhm, 2004].

Le groupe de participants a été constitué à l'aide de l'échantillonnage par jugement, technique utilisée lorsque les ressources sont limitées. 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 [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, et 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 permet d'obtenir des points de vue variés avec trois consultants (inspection, mesure de gaz, analyse et réduction du risque), deux conseillers en SST ou en sauvetage, cinq chefs d'exploitation, deux formateurs et trois travailleurs expérimentés. Une moyenne de 19 ans d'expérience a été comptabilisée.

2.4 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 (total de 18, 6x3). Au final, 19 entreprises ont été rencontrées avec une distribution proche de l'objectif initial : distribution électrique et télécom (x3), collecte et traitement des eaux (x3), transport de marchandises (x3), production de papier et carton (x3), maintenance industrielle et génie civil (x3) et fabrication de pièces et traitement chimique (x4). L'échantillon obtenu est varié concernant le profil des entreprises avec a) 7/19 entreprises du secteur public ou parapublic et 12/19 du secteur privé et b) 5/19 entreprises avec plus de 500 espaces clos et 6/19 avec moins de 50 espaces clos ou en sous-traitance. Pour 32% des entreprises, les participants rencontrés jouaient un rôle de concepteur côté client. L'ensemble des entreprises rencontrées avait un comité de SST, un programme de gestion des espaces clos et des employés formés, conformément aux critères de recrutement. La technique de l'échantillonnage par jugement a également été utilisée lors de cette phase. Le Tableau 3 fournit plus de détails sur les 30 types d'espaces clos ciblés dans les 19 entreprises.

Effectuées en contexte de pandémie, les études de cas ont eu lieu par visioconférence plutôt que sur site comme prévu initialement. La facilité du partage de photos ou de documents à l'écran par les participants afin d'illustrer leurs propos et la possibilité de réunir plus de personnes lors d'une même rencontre a permis de limiter les impacts sur la collecte. Les entrevues semi-dirigées se sont déroulées en trois temps [Brikci et Green, 2007] : 1) recueillir des informations générales sur l'entreprise et sa gestion des risques pour les espaces clos (environ 20 min) ; 2) déterminer et documenter les situations de travail en espace clos à cibler (40 min) ; 3) discuter des mesures PIPC mises en place, envisagées ou rejetées pour les situations ciblées (90 min). Chaque solution a été discutée en matière d'applicabilité dans le but d'identifier les facteurs favorisant et limitant.

2.5 Base de données relationnelle

Afin de concevoir une base de connaissances exploitable avec toutes les solutions évoquées lors des études de cas, un diagramme « entité-association » (EA) a été construit. Le diagramme EA est une représentation graphique utilisée lors de la conception de systèmes informatiques pour organiser l'information de manière logique. Le diagramme EA comprend des entités (c.-à-d. objets réels ou concepts ; ex. solutions évoquées, espaces clos, interventions), les attributs de ces entités (c.-à-d. description des entités) ainsi que les interrelations entre les entités [Chen, 1976]. Une fois le modèle finalisé, le diagramme EA a été converti en une base de données. La taxonomie des champs de données a été établie à l'aide des données recueillies lors des premières phases (ex. principes de PIPC, type d'espace clos).

3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Lacunes à la conception avec la technique de l'AdC

Les AdC développés pour les dix accidents mortels en espace clos ont permis d'explicitier pour chaque accident la combinaison d'événements qui ont conduit au décès. Globalement, les AdC étaient constitués de quatre branches qui permettaient d'expliquer : 1) l'origine du phénomène dangereux, 2) les raisons pour lesquelles la victime était dans ou autour de l'espace clos, 3) pourquoi la victime n'a pas pu éviter l'accident lorsque l'événement dangereux s'est produit et enfin 4) les raisons pourquoi l'entrant n'a pu être sorti de l'espace clos une fois que l'accident s'est matérialisé [González Cortés *et al.*, 2021a].

Tableau 1. Échantillon de dix accidents mortels sélectionnés

Type	Année	Secteur	Espace clos	Intervention	Décès	Cause	Côte CNESST
Intoxication	2004	Services	Station de pompage	Déblocage	3	Gaz (H ₂ S)	EN-003536
Asphyxie	2006	Chimique	Cuve	Polissage	3	Gaz (Ar)	EN-003643
Explosion	2016	Services	Camion-citerne	Soudure	1	Carburant	EN-004119
Coïncé par	1999	Énergie	Turbine	Maintenance	2	Pales de la turbine	EN-003202
Coïncé par	2011	Agricole	Mélangeur	Retrait du surplus	1	Pales mélangeur	EN-003895
Chute d'objet	2001	Mines	Trou de forage	Récupération objet	1	Chute d'une pièce	EN-003317
Chute de hauteur	2002	Pâtes et papiers	Séchoir	Nettoyage	1	Présence de vide	EN-003337
Électrocution	2007	Services	Plénum	Dépannage	1	Pièce sous tension	EN-003705
Ensevelissement	2012	Agricole	Silo	Retrait galettes moisies	1	Grains de maïs	EN-003935
Noyade	2014	Agricole	Puis d'accès	Réparation canalisation	1	Trou + eau	EN-004047

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

Service/Secteur	Fonction	Responsabilité - Espace clos	Expérience (an)
Services d'inspection	Consultant	Sous-traitant (entrant)	30
Conseils techniques	Sauveteur	Élaboration de plans de gestion du risque	20
Eaux potables et usées	Chef d'exploitation	Responsable des opérations/Gestion SST	25
Fabrication de machines	Formateur	Élaboration de plan de gestion du risque	14
Conseils techniques	Formateur	Élaboration de plan de gestion du risque	32
Transformation des métaux	Travailleur expérimenté	Représentant des travailleurs/Contremaître	14
Production électrique	Conseiller en SST	Gestion de la SST	11
Eaux potables et usées	Chef d'exploitation	Responsable des opérations/Gestion SST	21
Conseils techniques	Consultant	Élaboration de plans de gestion du risque	20
Eaux potables et usées	Chef d'exploitation	Responsable des opérations/Gestion SST	20
Eaux potables et usées	Chef d'exploitation	Responsable des opérations/Gestion SST	31
Instrumentation	Consultant	Sous-traitant (mesure gaz)	26
Secteur pétrolier	Travailleur expérimenté	Représentant des travailleurs/Contremaître	15
Agroalimentaire	Chef d'exploitation	Gestion de la SST	3
Agroalimentaire	Travailleur expérimenté	Champion en espaces clos	6

Tableau 3. Description des espaces clos ciblés dans les 19 études de cas

Espace clos	Type	Informations sur l'espace clos
Distribution électrique et télécom		
1 Puits d'accès	Trou d'homme	Accès aux câbles. 3 m de profond, 2,5 x 4 m. Entrée par le haut, 1,04 m de diamètre.
Collecte et traitement des eaux		
2 Bassin de décantation	Bassin	Décantation des boues. Bassin ouvert de grandes dimensions.
3 Réservoir filtration	Réservoir	Traitement eaux usées. Processus de filtration.
4 Dessableur	Bassin	Décantation et séparation des graisses. 4,5 m de profond, 4 x 20 m de long.
5 Digesteur	Réservoir	Valorisation des boues, biogaz. 12 m de haut, 12 m de diamètre. Entrée par le bas, en sous-sol.
6 Chambre de régulation	Chambre	Distribution eau potable. 2 m de profond, variable. Accès par le haut.
7 Regard d'égout	Trou d'homme	Accès à la canalisation. 1,8 m de profond. Entrée par le haut, 0,76 m de diamètre.
8 Poste de pompage	Trou d'homme	Relèvement avec pompes submersibles au fond. >10 m de profond. Entrée par le haut, trappe.
Transport de marchandise		
9 Wagon gondole	Bassin	Conteneur pour transport ferroviaire. 2 m de profond, 3 x 13 m de long. Entrée par le haut.
10 Conteneur roll-off	Bassin	Conteneur pour transport routier. 2 m de profond, 3 x 6 m de long. Entrée par le haut.
11 Camion-citerne	Réservoir	Citerne en acier. Cloisonnée partiellement. Ouverture sur le dessus, 0,30 m de côté.
12 Boule de bétonnière	Réservoir	Brassage et distribution du béton. 8 m ³ , 2 m de diamètre. Entrée sur le côté, 0,41 x 0,48 m.
13 Wagon-citerne	Réservoir	Transport ferroviaire. 3 m de diamètre, 15 m de long. Accès sur le dessus, 0,46 m de diamètre.
Production de papier et carton		
14 Réservoir de liqueur noire	Réservoir	Stockage d'un produit issu du procédé. 9 m de diamètre, 15 m de haut. Ouvertures sur le dessus et en bas (0,60 x 0,60 m).
15 Cuvier à pâte	Réservoir	Stockage de la pâte. Volume en tonnes de pâtes. 1-2 ouvertures sur le dessus et en bas.
Maintenance industrielle		
16 Presse hydraulique	Trou d'homme	Accès sous la presse pour le système hydraulique. 2 m de profond. Accès par le haut.
17 Précipitateur électrostatique	Int. équipement	Captage de la poussière de combustion de la chaudière. Plusieurs étages de haut.
18 Chaudière à vapeur d'eau	Int. équipement	Chambre chauffée qui contient de 3000-6000 tubes dans lesquels circulent de l'eau. Plusieurs étages de haut, espace intérieur restreint. Plusieurs ouvertures restreintes sur les côtés.
19 Fournaise industrielle	Int. équipement	Chambre de combustion. Plusieurs étages de haut.
20 Cheminée	Cheminée	Fournaise industrielle. 60 m de haut, diamètre de plusieurs mètres. Entrée par le haut.
21 Colonne de séparation	Cheminée	Colonne de séparation. 60 m de haut, 1,5 m de diamètre. Entrée sur le côté, 0,46 m de diamètre.
22 Réservoir pétrolier	Réservoir	Stockage pétrole sur une raffinerie. Très grand volume (millions de litres). Entrée sur le côté.
Génie civil		
23 Infrastructure génie civil	Chambre	Accès dans un ouvrage de génie civil. Ouverture pour l'entrée pas toujours planifiée.
Fabrication de pièces et traitement chimique		
24 Réservoir produit liquide	Réservoir	Stockage liquide alcalin. 5 m de haut, 12 m de diamètre. Entrées sur le dessus et le côté, 1,2 m de diamètre.
25 Cuve produit procédé	Bassin	Stockage de cire. 5 m de haut et 3 m de diamètre. Entrée par le dessus.
26 Bassin produits chimiques	Bassin	Dégraissage. Produits chimiques (ex. HF, HNa). 2 à 3,5 m de profond.
27 Silo, dépoussiéreur	Réservoir	Stockage de matière solide. 9 m de haut. Entrée sur le côté en hauteur.
28 Trémie	Réservoir	Stockage matière solide. 5 m de haut, 3 m de côté. Entrée par le haut ou le côté.
29 Silo de sable	Réservoir	Alimentation du procédé en circuit fermé. 7 m de haut, 2 m de diamètre. Entrée par le haut.
30 Convoyeur de fosse	Int. équipement	Récupération copeaux issus de l'usinage. 2,5 m sous le niveau du sol. Entrée par le haut.

L'identification des causes profondes dans chacun des cas a permis de discuter les lacunes de conception. Prenons l'exemple de l'accident de 2002 au Tableau 1 qui a eu lieu à l'intérieur d'un procédé industriel pour sécher des particules de bois. L'entrée dans l'espace clos était requise aux quatre à six semaines pour nettoyer les résidus qui s'accumulaient à un endroit précis du procédé. L'accumulation systématique de résidus dans le conduit est une cause de l'accident. Il s'agit d'un fait habituel et accepté depuis de nombreuses années, bien qu'il s'agisse d'une situation indésirable. La présence de cette accumulation peut être questionnée du point de vue de la conception (c.-à-d. qu'est-ce qui aurait pu être fait pour éviter cette accumulation?). Dans un deuxième temps, si l'accumulation ne peut être évitée, la nécessité d'entrée dans l'espace clos pour faire le nettoyage peut être remise en question (c.-à-d. le concepteur n'aurait-il pas pu prévoir des trappes pour nettoyer les résidus en restant à l'extérieur de l'équipement?). En multipliant ce genre de questionnement en lien avec les causes profondes des 10 accidents, certaines lacunes à conception sont apparues comme récurrentes. Le Tableau 4 identifie les cinq types de lacunes à la conception répertoriées ainsi que des suggestions d'alternatives de conception formulées par l'équipe de recherche à cette étape de la recherche pour contourner le problème.

La première lacune à la conception est l'introduction d'un espace clos dans le design du procédé alors que des alternatives auraient pu être possibles (ex. cabinet hors terre plutôt qu'un puits souterrain). Par la suite, on peut noter des problèmes d'anticipation à la conception qui conduisent à des entrées en espace clos évitables en lien avec une dégradation prévisible dans l'espace clos (ex. accumulation de résidus, blocage, pièce critique dégradée) ou encore du manque d'accessibilité depuis l'extérieur aux points d'intervention prévisibles dans l'espace clos. Finalement, si l'entrée est nécessaire, la conception ne facilite pas l'accès, les déplacements et le contrôle efficace des risques (ex. ventilation, cadenassage).

Ainsi, la méthode de l'AdC permet de traduire 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 (Behm, 2005 ; Gambatase *et al.*, 2017). Les 15 experts rencontrés ont abordé ce point et ont identifié plusieurs raisons pour expliquer le manque d'adoption de mesures à la conception pour les espaces clos sur le terrain:

1. Les concepteurs ne prennent pas pleinement en compte l'ensemble du cycle de vie de l'infrastructure notamment sa maintenance. Les entrées en espace clos ne sont pas anticipées comme elles le devraient. Le problème est ultimement reporté sur l'exploitant (propriétaire) qui se retrouve limité dans ses options de modifications.
2. Il manque des connaissances concrètes disponibles pour les concepteurs et les exploitants sur la mise en application des mesures à la conception (ex. guides sur mesure). Inciter les concepteurs à suivre leur ouvrage dans le temps serait un moyen de sensibilisation efficace et une source d'information riche.
3. Du côté de l'exploitant, il est parfois difficile de justifier les investissements additionnels à la conception à cause d'une planification financière à court terme (ex. budget annuel). En effet, les retours sur investissement se feront généralement à plus longs termes avec des opérations de maintenance à la fois simplifiées et plus sûres.
4. Une conception sécuritaire demande une anticipation et une planification qui semblent souvent difficiles à mettre en place dans le cours des opérations quotidiennes. En tant qu'exploitant, avoir une planification à long terme peut se traduire par l'application d'une politique d'achats et de conception qui intègre et privilégie les mesures de PIPC.

3.2 Principes et sous-principes

Les lacunes de conception identifiées avec l'analyse des accidents mortels ont permis d'identifier quelques pistes de solution de PIPC (Tableau 4). C'est sur cette base que l'équipe de recherche a débuté les discussions avec les experts et les participants des études de cas. Les 30 espaces clos ciblés dans les 19 entreprises recrutées (Tableau 3) ont permis de discuter de plus d'une centaine de solutions, chacune associée à un contexte spécifique.

Tableau 4. Lacunes à la conception des espaces clos en se basant sur l'analyse approfondie de dix accidents mortels

Types de lacune à la conception	Description du problème	Suggestions de conceptions alternatives
Création d'un espace clos	Le design du procédé industriel incorpore des espaces avec confinement où l'occupation humaine est possible (ex. réservoir, puits d'accès).	Diminution du nombre de réservoirs de stockage dans le procédé ; installation d'un système hors sol plutôt que souterrain ; dimensions de l'espace et des ouvertures trop petites pour une occupation humaine.
Dégradation non anticipée dans l'espace clos	Les mécanismes de dégradation et les événements critiques dans l'espace clos ne sont pas identifiés et anticipés lors de la conception du point de vue de l'intervention de maintenance. Cela conduit à des entrées potentiellement évitables : accumulation de résidus, points de blocage/colmatage des fluides et solides en transition, dégradation précoce des pièces et matériaux à cause des conditions environnantes, etc.	Gestion des résidus afin de limiter leur accumulation (ex. filtrage en amont, brassage, vibration, etc.) ; amélioration de l'écoulement des fluides et des solides ; utilisation d'alliage de matériaux adapté aux produits chimiques présents ; pièces critiques surdimensionnées.
Points d'intervention hors de portée	L'accessibilité, depuis l'extérieur, des éléments sur lesquels une intervention va être nécessaire (ex. inspection, nettoyage) n'est pas anticipée à la conception.	Délocalisation du système à l'extérieur de l'espace clos (ex. capteur, pompe, système hydraulique) ; système pour manutentionner un équipement depuis l'extérieur (ex. pompe submersible fixée sur les guides et à un palan) ; trappes pour l'inspection ou le nettoyage afin notamment de faciliter l'utilisation de caméra et de perche ; automatisation du nettoyage par l'intermédiaire du procédé ; automatisation de la surveillance à l'aide d'instrumentation.
Entrée et déplacement dans l'espace clos difficile	Si l'entrée est nécessaire, la conception ne facilite aucunement l'accès dans l'espace clos ainsi que les déplacements.	Augmentation du nombre et de la taille des entrées ; positionnement facilitant des entrées (ex. en bas du réservoir) ; aménagement de l'espace autour des entrées (ex. plateforme à la bonne hauteur pour les entrées horizontales) ; moyen d'accès permanent dans l'espace (ex. échelle fixe) ; ancrage permanent.
Contrôle des risques inefficace	L'opérationnalisation du contrôle des autres risques n'est pas anticipée à la conception : ventilation naturelle et mécanique, éclairage, cadenassage, commandes, etc.	Ajout d'ouvertures pour favoriser la ventilation naturelle ou la mise en place de ventilation mécanique ; dispositif de verrouillage associé à l'ouverture de la trappe d'entrée ; dispositif d'isolement cadenassable positionné à proximité.

La plupart des solutions dans la base de connaissances ont été évoquées dans un contexte de modification de l'existant (réetrofit) (80 %), situation plus facile à envisager pour les participants bien que plus limitée en termes de possibilité. 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. Les solutions rapidement écartées par les participants lors des discussions ont été notées, mais pas directement incluses dans la base puisque l'objectif était de recenser des mesures applicables. Toutefois, la plupart des solutions rejetées ont finalement été incluses par l'intermédiaire des autres études de cas (ex. ajout d'ouvertures, caméra d'inspection). C'est également le cas des suggestions faites par les experts et lors de l'analyse des accidents à l'exception de certaines solutions en lien avec la robotisation et l'automatisation qui n'ont pas été retenues à cause des contraintes de coût notamment. D'ailleurs, les principales raisons pour rejeter rapidement une solution ont été un coût trop grand devant une efficacité réduite (ex. entrée toujours nécessaire malgré les modifications) ou une incompatibilité technique.

González Cortés *et al.* [2021b] ont proposé cinq principes généraux de réduction du risque à la conception pour les espaces clos (Tableau 5, colonne 1). Dans cet article, au Tableau 5, chaque principe a été associé à des sous-principes, plus proches de la réalité du terrain.

Afin de passer en revue les différents principes et sous-principes du Tableau 5, les chambres de régulation de pression (CRP) pour le réseau de distribution de l'eau potable d'une municipalité (Tableau 3, #6) sont un bon exemple. Les CRP sont un accès souterrain à des équipements de régulation de pression. Leur nombre peut se compter en centaines dans les grandes municipalités. Ainsi, en lien avec le contenu du Tableau 5 :

1. L'élimination d'une CRP peut être possible en faisant remonter la tuyauterie dans un local technique hors sol plutôt qu'en creusant une chambre (sous-principe : *cabinet hors terre*). Les contraintes d'une telle solution sont liées à la gestion du gel l'hiver, à la taille des canalisations et à l'intégration du cabinet hors sol dans l'urbanisme (ex. emprise sur la voie publique, protection contre les collisions). Toutefois, cette solution coûte moins cher qu'une chambre traditionnelle sans compter les bénéfices pour la SST. L'autre principe envisageable est de diminuer le nombre de CRP sur un territoire (sous-principe : *procédé en continu*). Toutefois, cette solution peut générer des problèmes sur le bon contrôle de la pression et reste très limitée en pratique.
2. Le déclassement de la CRP peut passer par la transformation de l'espace avec l'ajout d'un escalier conforme au code, de la ventilation et de l'éclairage permanent, etc. Ce type de solution a déjà été mis en place dans les cas où l'espace urbain en souterrain est suffisant (prend plus de place) et où la trappe d'accès peut être installée hors voirie (sous-principe : *lieu isolé*). Ce genre de solution ne peut pas être effectuée en « retrofit », mais seulement lors d'une nouvelle construction.
3. La suppression complète d'une entrée pour une tâche spécifique peut se traduire par l'utilisation de caméra d'inspection pour poser un diagnostic sur l'état de la structure de la CRP et de ses équipements (sous-principe : *diagnostic sans entrée*). Aussi, les relevés de mesures peuvent être gérés par télémétrie (sous-principe : *automatisation*). Finalement, la *délocalisation* s'est traduite par la séparation de la partie électrique/électronique de la CRP en la plaçant dans une armoire à l'extérieur sur la voirie. Le sous-principe de *mobilité* ne s'est pas matérialisé pour les CRP.

Tableau 5. Sous-principes issus des études de cas pour agir au niveau de la conception afin de réduire les risques associés aux interventions en espace clos

Principes de PIPC associé aux espaces clos [González Cortés et al., 2021b]	N	Sous-principes issus des études de cas
Éliminer complètement l'espace clos	5	<i>Cabinet hors terre</i> : faire remonter les raccordements électriques ou la tuyauterie dans un local au niveau du sol plutôt qu'un puits d'accès souterrain ou une chambre de vanne. <i>Procédé en continu</i> : diminuer le nombre de réservoir tampon.
Déclasser l'espace clos en travaillant sur les risques, pour une occupation humaine	2	<i>Lieu isolé</i> : réaménagement de l'espace avec une entrée sans contrainte, des escaliers conformes au code, une ventilation et un éclairage permanent, etc. accompagné d'une analyse du risque complète.
Supprimer complètement la nécessité d'entrée pour une tâche spécifique (ex. inspection, nettoyage)	18	<i>Diagnostic sans entrée</i> : utilisation de caméra (ex. 360°, thermique d'inspection) et d'un moyen pour atteindre la cible visée (ex. drone, sous-marin, perche). Prévoir des trappes d'inspection à la conception. <i>Délocalisation</i> : déplacer un système qui nécessite une intervention à l'extérieur de l'espace clos (ex. capteur). <i>Mobilité</i> : rendre un système mobile afin de pouvoir le sortir de l'espace clos en restant à l'extérieur (ex. pompe immergée fixée à un rail et un palan). <i>Automatisation</i> : intégration dans le procédé d'équipement contrôlé par un automate pour gérer une tâche notamment de nettoyage (ex. robot, racloir, jets sous pression).
Réduire le besoin d'entrée de manière générale, diminuer la fréquence des entrées	42	<i>Gestion des résidus</i> : optimisation du filtrage en amont, de l'écoulement dans l'espace clos (ex. pente, pas de zone « morte ») ou encore mise en suspension des résidus (agitateur, buses). <i>Perches et outillage</i> : utilisation d'outils, de type perches, équipés d'accessoires (ex. jet d'eau 360°, vacuum, grattoir, pince) pour faire une bonne partie du nettoyage depuis l'extérieur. Prévoir des trappes d'accès à la conception. <i>Durabilité/maintenabilité</i> : anticipation de la dégradation de pièces critiques en trouvant le bon alliage ou en facilitant le remplacement (ex. boulonnage plutôt que soudage).
Améliorer l'accès, l'intervention et l'évacuation par des ajouts à la conception	45	<i>Conception des entrées</i> : minimum de 977 mm de diamètre, au nombre de deux minimum pour faciliter la ventilation et le sauvetage (dont une positionnée en bas dans le cas des réservoirs), facile à ouvrir. <i>Amélioration de l'accès</i> : par exemple, ancrages et socles de potence permanents pour le risque de chute et le sauvetage, poignée au-dessus de l'entrée dans le cas d'un accès horizontal, moyen d'accès ajusté jusqu'à l'entrée, ouverture en 2 temps avec un caillebotis qui protège du risque de chute dans le cas d'un accès vertical. <i>Anticipation des déplacements</i> : échelle droite plutôt que décalée pour rester attaché à la ligne de vie, trottoir ou faux-plancher pour se déplacer sur un fond plat, chemin d'accès simplifié jusqu'au point d'intervention requis.

4. Concernant la réduction du nombre d'entrées, on peut nommer l'ajout d'un panier sous le couvercle pour récupérer les déchets susceptibles de tomber dans l'espace clos comme les seringues contaminées (sous-principe : *gestion des résidus*). Aussi, tous les supports en acier sont remplacés dans les nouveaux ouvrages par des cornières en fibre de verre beaucoup plus durables (sous-principe : *durabilité/maintenabilité*). À noter que ces deux sous-principes ont plutôt été discutés dans le cas des puits d'accès électrique qui peuvent présenter une configuration assez similaire au CRP. Par ailleurs, il est possible d'utiliser des perches pour prendre des mesures sur les infrastructures (ex. tuyauterie) sans entrer (*perche et outillage*).
5. Concernant l'amélioration de l'accès, de l'intervention et du sauvetage, on peut citer l'agrandissement de la trappe d'accès de la CRP (sous-principe : *conception des entrées*), son placement sur le trottoir plutôt que sur la route (sous-principe : *amélioration des accès*) et enfin l'ajout de garde-corps et de socle de potence permanent pour la gestion du risque de chute (sous-principe : *anticipation des déplacements*).

Les CRP ne sont qu'un type d'espace clos parmi les trente étudiés. L'ensemble des solutions évoquées lors des études de cas, incluant les détails spécifiques du contexte de travail, devraient être mises à disposition du grand public lors d'un exercice subséquent de transfert des connaissances. Ce transfert pourrait prendre la forme d'une base de données avec des options de filtres (ex. principes et sous-principe, type d'espace clos) [Burllet-Vienney *et al.*, 2022].

De manière générale, on observe que les solutions concernant les principes d'élimination complète et de déclassement par les risques, qui sont les principes les plus efficaces, ne représentent que 6% des solutions de la base de données contre 54% pour les principes liés à la diminution de la fréquence des entrées et 40% pour l'amélioration de l'entrée. En effet, ces deux principes sont plus difficiles à mettre en œuvre lorsqu'on parle de structures existantes, ce qui est généralement le cas sur le terrain. Toutefois, lorsqu'on travaille sur la construction de nouvelles infrastructures, ces principes devraient être privilégiés.

Autre constat, la robotique (ex. drone avec caméra) et l'automatisation (ex. nettoyage intégré, internet des objets) sont connues, mais encore peu envisagées/implantées malgré leur potentiel pour éviter des entrées. Les raisons évoquées sur le terrain sont liées aux coûts d'acquisition, au fait que les entreprises ne possèdent pas l'expertise en interne et doivent planifier ces activités en sous-traitance, mais aussi au fait qu'il y a encore des limites d'utilisation dans certaines situations que ce soit en inspection, en nettoyage ou en réparation. On peut penser à des facteurs comme le manque d'agilité, de force disponible ou encore une perception de l'environnement limitée.

On peut également noter que l'accumulation de résidus dans les espaces clos est à l'origine de nombreuses interventions de nettoyage et de déblocage, de dégradation (ex. rouille) et de risques biologiques et atmosphériques (ex. contamination, intoxication). La gestion des résidus est revenue dans un grand nombre d'études de cas.

Finalement, il convient de mentionner les limites des solutions basées sur la réduction de la fréquence des entrées et l'amélioration des entrées et du sauvetage. Malgré le fait que ces mesures réduisent les risques pour tous les entrants à la conception, des entrées en espace clos devront toujours être gérées (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 évaluation complète des risques et non sur une simple approche de déclassement en travaillant sur les critères de la définition réglementaire d'un espace clos.

3.3 Limites de l'étude

Une approche transversale a été choisie lors des échantillonnages concernant le secteur d'activité, le type d'espace clos ou encore le type d'intervention afin de bâtir une base de connaissances riche et variée en matière de situations de travail. Néanmoins, les types d'espace clos et d'interventions à effectuer en espace clos étant très diversifiés, cette base de connaissances ne peut pas aborder spécifiquement tous les secteurs d'activité ni toutes les contraintes associées à un milieu de travail. Il s'agit d'une limite de cette étude. Il faudrait pour pallier cette limite augmenter le nombre d'études de cas. Aussi, les connaissances développées devraient plutôt être vues comme une base de discussion à adapter à l'activité de travail ciblée.

Une autre limite de l'étude a été que des concepteurs-fabricants n'ont pas pu être inclus autant que souhaité dans l'échantillon. Cela peut expliquer le peu de solutions pour les principes de l'élimination complète et du déclassement par les risques dans les études de cas. En effet, ces solutions sont plus difficiles à mettre en œuvre dans un contexte de modification de l'existant (rétrofit).

4 CONCLUSION

La réduction des risques à la conception est le moyen à privilégier selon la législation et la normalisation en SST. Dans cette perspective, plus d'une centaine des mesures applicables à la conception des espaces clos ont été recensées. Des principes et des sous-principes pour agir au niveau de la conception afin de réduire les risques associés aux interventions en espace clos ont été identifiés et présentés dans l'article.

En considérant les contraintes techniques et organisationnelles présentes dans les milieux de travail, il apparaît que les options sont parfois limitées pour les exploitants dans un contexte de modification de l'existant. Ainsi, la sensibilisation des concepteurs afin qu'ils anticipent dès la conception initiale la présence de risques en SST sur l'ensemble de vie de leur ouvrage demeure la meilleure option. Sur ce point, le domaine de recherche du DHM semblerait une avenue à développer. Pour la recherche, cela impliquerait de travailler avec des concepteurs d'espaces clos plutôt qu'au niveau des exploitants. Il faudra aussi travailler sur le transfert efficace de connaissances développées à l'aide d'un guide ou d'une base de données publique.

5 REMERCIEMENTS

L'équipe de recherche exprime sa gratitude à tous les participants de l'étude. Nous soulignons leurs nombreuses suggestions pour améliorer la gestion des risques liée aux interventions en espace clos. L'équipe de recherche remercie également l'IRSST pour le financement du projet associé à cet article ainsi que le développement et l'hébergement de l'outil d'analyse du risque E.CLOS.

6 REFERENCES

Alsayed, A., Nabawy, M.R.A., Yunusa-Kaltungo, A., Quinn, M.K., & 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 National Standards Institute & 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 & American Society of Safety Engineers. (2016). *Safety requirements for entering confined spaces*. Norme ANSI/ASSE : Z117.1.
- Association canadienne de normalisation, 2016. *Gestion du travail dans les espaces clos*. Norme CSA Z1006.
- Athar, M., Shariff, A. M., Buang, A., Nazir, S., Hermansyah, H., & 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, & I. Steinke (édit.), *A companion to qualitative research* (p. 270-275). SAGE Publications.
- Botti, L., Ferrari, E., & Mora, C. (2017). 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>
- Brikci, N., & 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., Bahloul, A., González-Cortés, A., Ouellet, C., & Ben-Mosbah, A. (2022). *Réduction des risques lors des interventions en espace clos : développement d'une base de connaissances sur la prévention intrinsèque et la protection collective*. (Rapport n° R-1167-fr). IRSST. <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-1167-fr.pdf>
- Carter, N., Bryant-Lukosius, D., DiCenso, A., Blythe, J., & Neville, AJ. (2014). The use of triangulation in qualitative research. *Oncol Nurs Forum*, 41(5), 545-547. <https://doi.org/10.1188/14.ONF.545-547>
- Chaffin, D. B. (2008). Digital Human Modeling for Workspace Design. *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, 4(1), 41-74. <https://doi.org/10.1518/155723408X342844>
- 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>
- Chinniah, Y., Bahloul, A., Burlet-Vienney, D., & 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>
- Gambatese, J. A., Toole, T.M., & 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)
- González Cortés A., Burlet-Vienney, D., & 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., Burlet-Vienney, D., Chinniah, Y., Ben Mosbah, A., Bahloul A., & Ouellet, C. (2021b). Inherently Safer Design (ISD) solutions in confined spaces: Experts' practical feedback in Quebec, Canada. *Process Safety and Environmental Protection*, 157(1), 375-389. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.11.044>
- Gordillo Paneque, C. (2019). *New Process and Interface for Virtual Ergonomics Interventions* [Mémoire de maîtrise]. Polytechnique Montréal.
- Gupta, J. P., & Edwards, D.W. (2002). Inherently safer design—present and future. *Process Saf. Environ. Prot.*, 80(3), 115-125. <https://doi.org/10.1205/095758202317576210>
- International Organization for Standardization. (2010). *Sécurité des machines - Principes généraux de conception - Appréciation du risque et réduction du risque*. Norme ISO12100.
- Khan, F., Rathnayaka, S., & 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>
- 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>
- Leplat, J. (1978). Accident analysis and work analysis. *J. Occup. Accid.*, 1(1978), 331-340.
- Loi sur la santé et la sécurité du travail. RLRQ, c. S-2.1.
- Palinkas, L., Horwitz, S., Green, C., Wisdom, J., Duan, N., & 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., & 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>
- Paul, G., Abele, N. D., & Kluth, K. (2021). A Review and Qualitative Meta-Analysis of Digital Human Modeling and Cyber-Physical-Systems in Ergonomics 4.0. *IISE Trans Occup Ergon Hum Factors*, 9(3-4), 111-123.
- Rayner Brown, K., Hastie, M., Khan, F. I., & 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>
- Règlement sur la santé et la sécurité du travail. RLRQ, c. S-2.1, r.13.
- Schall, M.C., Fethke, N. B., & Roemig, V. (2018). Digital Human Modeling in the Occupational Safety and Health Process: An Application in Manufacturing. *IISE Trans Occup Ergon Hum Factors*, 6(2), 64-75.
- Standards Australia (2009). *Safe working in a confined space*. Norme AS/NZS 2865.
- Windapo, A. O., Oyewobi, L., & 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>