

État de l'art portant sur les technologies de détection de personnes applicables aux chantiers de construction

Alireza Saidi

RAPPORT D'EXPERTISE
DIFFUSION PUBLIQUE

QR-1120



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

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du 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
2021
ISBN : 978-2-89797-142-7

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec) H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail
Mars 2021

État de l'art portant sur les technologies de détection de personnes applicables aux chantiers de construction

Alireza Saidi

RAPPORT D'EXPERTISE
DIFFUSION PUBLIQUE

QR-1120



Avis de non-responsabilité

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.



NOTE AU LECTEUR

Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.
Les résultats des travaux publiés dans ce document n'ont pas fait l'objet d'une évaluation par les pairs.



NOTE AU LECTEUR

Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.
Les résultats des travaux d'expertise publiés dans ce document n'ont pas fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier chaleureusement monsieur Blaise Labrecque, le directeur du Service prévention des risques mécaniques et physiques à l'IRSST, pour l'ensemble des échanges constructifs tout au long des recherches et la préparation de ce rapport.

Un grand merci à monsieur Damien Burlet-Vienney et monsieur Laurent Giraud, chercheurs à l'IRSST, pour les discussions autour du concept de la détection de proximité pour les engins mobiles dans les milieux de travail, ainsi que l'ensemble des documentations qu'ils ont bien voulu mettre à la disposition de l'auteur.

Il remercie également monsieur Jean Chassé, conseiller principal en santé et en sécurité du travail à la division de la prévention de la ville de Montréal pour les discussions concernant ses travaux sur les systèmes de détection de proximité à embarquer sur les véhicules des services publics.

Il souhaite par ailleurs exprimer ses sincères remerciements à madame Monica Mirea, adjointe administrative à la Direction de la recherche et de l'expertise de l'IRSST pour son assistance dans la préparation du rapport final de l'expertise.

Merci à l'ensemble des producteurs, des fournisseurs et des représentants des compagnies qui proposent des technologies de détection de proximité et de prévention de collision pour les véhicules dans les milieux de travail qui ont bien voulu partager des documents techniques avec nous et répondre à nos questions par le courriel, des appels téléphoniques et des vidéoconférences : IFM Electronics, Mobileye, Matrix Team, Toromont Cat (Caterpillar), Guardvant, Proxipi, SaveX, Canado/nacan Équipements Inc. et Provix Inc.

SOMMAIRE

Malgré l'adoption des procédures sécurité et les moyens d'avertissement, le nombre d'accidents liés à la collision entre des travailleurs et des engins mobiles dans le secteur de la construction demeure important. La présence sur les chantiers de construction de différents types d'équipements mobiles ayant des parties articulées peut occasionner des risques de collision. D'autant plus que la nature dynamique et les espaces confinés dans les chantiers de construction exigent souvent que les travailleurs soient à proximité des machines.

Devant la préoccupation de la CNESST à cet égard, la présente expertise dresse l'état de l'art des systèmes de détection de personnes applicable au domaine de la construction qui permettent de détecter les situations de proximités dangereuses et d'alerter en temps réel les opérateurs des équipements mobiles ou les travailleurs piétons afin de réduire les risques de collisions.

Le présent rapport explore les normes et les réglementations en vigueur sur l'obligation de l'utilisation des systèmes de détection de proximité pour les équipements mobiles dans certains secteurs industriels. Il traite des principales technologies de détection de personnes à proximité des engins mobiles et parcourt les travaux majeurs de recherche en santé et en sécurité du travail qui abordent ces types de dispositifs. Le rapport inclut aussi une liste des systèmes commercialement disponibles pour les équipements utilisés en construction et des secteurs proches, ainsi qu'une analyse sur les avantages et les limites de chacune des technologies. Enfin, tous les systèmes destinés au domaine de la construction sont présentés en détail et l'état des connaissances est discuté pour ainsi permettre de mieux élucider les pistes d'éventuels projets de recherche à entreprendre sur cette problématique.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	I
SOMMAIRE	III
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XI
1. INTRODUCTION	1
2. ÉTAT DES CONNAISSANCES	3
3. OBJECTIFS DES TRAVAUX	5
4. MÉTHODOLOGIE	7
5. RÉSULTATS	9
5.1 Normes en vigueur	9
5.2 Principes technologiques des systèmes de détection de proximité	10
5.2.1 Systèmes centralisés	10
5.2.2 Systèmes embarqués	11
5.2.3 Zone de proximité autour de l'équipement mobile	11
5.3 Catégories de technologies de détection de proximité à embarquer sur les équipements mobiles	12
5.3.1 Détection de proximité par les technologies de radiofréquence	12
5.3.2 Détection de proximité par les technologies de radar	16
5.3.3 Détection de proximité par les technologies à ultrasons.....	18
5.3.4 Détection de proximité par les technologies de traitement d'image.....	20
5.3.5 Détection de proximité par la technologie de balayage laser	22
5.3.6 Détection de proximité par la technologie électromagnétique	24
5.4 Travaux de recherche en santé et en sécurité du travail pour la détection des travailleurs à proximité des équipements mobiles.....	26
5.5 Fournisseurs de systèmes anticollisions par détection de proximité pour le milieu de travail	28
5.6 Systèmes commercialisés destinés au domaine de la construction.....	31
5.6.1 Body Guard Safety	32
5.6.2 Eleksen	33
5.6.3 Zone Safe	33
5.6.4 Preco Electronics Inc.	34
5.6.5 Kigistec	35

5.6.6	Safety Shield Global	36
5.6.7	Hitachi Construction Machinery	37
5.6.8	Provix Inc.	37
5.6.9	IFM Electronics	38
5.6.10	Strata Worldwide	39
5.6.11	Proxipi	39
5.6.12	Savex.....	40
5.6.13	Caterpillar	41
5.6.14	Blue Electronics	42
5.6.15	PBE Group.....	44
6.	DISCUSSION	45
6.1	Disponibilité des systèmes de détection de proximité	45
6.2	Portée technologique des systèmes de détection de proximité	46
7.	CONCLUSION.....	49
	BIBLIOGRAPHIE	51
	ANNEXE A	55
A.I	Systèmes basés sur la technologie de détection radiofréquence	56
A.II	Systèmes basés sur la technologie de détection à ultrasons.....	59
A.III	Systèmes basés sur technologie de détection électromagnétique.....	61
A.IV	Systèmes basés sur une combinaison de technologies de détection	62
	ANNEXE B	65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	La portée effective de différents types de marqueur RFID.....	14
Tableau 2.	Caractéristiques des technologies de détection de proximité par la radiofréquence	15
Tableau 3.	Caractéristiques des technologies de détection de proximité par radar.....	17
Tableau 4.	Caractéristiques des technologies de détection de proximité à ultrasons.....	19
Tableau 5.	Caractéristiques des technologies de détection de proximité par traitement d'image.....	21
Tableau 6.	Caractéristiques des technologies de détection de proximité par balayage laser.....	23
Tableau 7.	Caractéristiques des technologies de détection de proximité par champ magnétique.....	25
Tableau 8.	Principaux fournisseurs de systèmes anticollisions de détection de proximité classés selon la technologie utilisée et le secteur industriel.....	29
Tableau 9.	Systèmes disponibles dans le commerce destinés à d'autres secteurs que la construction, étant basés sur la technologie de détection radiofréquence	56
Tableau 10.	Systèmes disponibles dans le commerce destinés à d'autres secteurs que la construction, étant basés sur la technologie de détection à ultrasons	59
Tableau 11.	Systèmes disponibles dans le commerce destinés à d'autres secteurs que la construction, étant basés sur la technologie de détection électromagnétique	61
Tableau 12.	Systèmes disponibles dans le commerce destinés à d'autres secteurs que la construction, étant basés sur une combinaison de technologies de détection.....	62
Tableau 13.	Systèmes anticollision par la détection de proximité, étant destinés au secteur de l'automobile	66
Tableau 14.	Systèmes centralisés d'anticollision par la détection de proximité.....	68

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Exemple de système centralisé de détection de proximité pour une mine à ciel ouvert	10
Figure 2.	Exemple de système embarqué de détection de proximité pour une mine souterraine	11
Figure 3.	Exemple de création de plusieurs zones de détection de proximité pour un équipement de mine souterraine	12
Figure 4.	Illustration schématique d'un système de détection de proximité basé sur l'identification par radiofréquence.....	13
Figure 5.	Illustration schématique d'un système de détection de proximité basé sur les ondes radiofréquence ULB	14
Figure 6.	Exemple d'un système de détection de proximité par radar.....	16
Figure 7.	Exemple d'un système de détection de proximité à ultrasons.....	18
Figure 8.	Exemple d'un système de détection de proximité par traitement d'image appliqué au domaine de la construction	20
Figure 9.	Illustration schématique (vue de dessus) d'un système de détection de proximité basé sur le balayage laser	22
Figure 10.	Illustration schématique (vue de dessus) d'un système de détection de proximité par champ magnétique	24

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

3D :	3 dimensions
ACARP :	Australian Coal Association Research Program
BAUA :	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Institut fédéral allemand pour la sécurité et la santé au travail)
CNESST :	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
CSIRO :	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
ÉPI :	Équipement de protection individuel
DEL :	Diode électroluminescente
IFA :	Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (Institut pour la sécurité et la santé au travail de l'assurance sociale d'accident allemande)
IMS :	IP Multimedia SubSystem
INRS :	Institut National de Recherche et de Sécurité
G :	Unité d'amplitude de vibration
Hz :	Hertz (unité de la mesure de la fréquence)
GNSS :	Global Navigation Satellite System
GPS :	Global Positioning System
MSHA :	Mine Safety and Health Administration
NIOSH :	National Institute for Occupational Safety and Health
OSHA :	Occupational Safety and Health Administration
RF :	Radiofréquence
RFID :	Radiofrequency Identification
s :	seconde (unité de temps)
UHF :	Ultra High Frequency (Ultra Haute Fréquence)
ULB :	Ultra large bande

1. INTRODUCTION

Devant l'importance du nombre et de la gravité des accidents impliquant les travailleurs piétons et les engins mobiles sur les chantiers de construction, la CNESST a exprimé son souhait d'obtenir plus d'informations sur les systèmes de détection de personnes autour des engins mobiles dans les milieux de travail. À cet effet, au mois de mars 2019, la CNESST a formulé une demande afin que l'IRSST présente une documentation réunissant une revue des technologies de détection de personnes à proximité des engins mobiles dans les milieux de travail. Afin de répondre à cette requête, une première ébauche des recherches a été présentée par la Direction de la recherche et de l'expertise de l'IRSST lors de la rencontre du Comité de liaison CNESST-IRSST de juin 2019. Ce document présentait les majeures catégories de système de détection de personne à proximité des engins mobiles, une liste des plus importantes technologies utilisées à cette fin, une énumération des fabricants de systèmes selon chaque technologie de détection et un résumé de recommandations pour une meilleure stratégie permettant d'instaurer une infrastructure afin d'éviter les collisions entre des personnes et des engins mobiles. Lors de cette même rencontre, la CNESST a demandé à ce que les travaux de recherche se concentrent sur les solutions destinées aux équipements mobiles utilisés sur les chantiers de construction.

En date de 29 juillet 2019, la CNESST a formulé une demande officielle en souhaitant avoir à sa disposition un rapport d'expertise de l'IRSST sur les différents systèmes de détection de personnes lors de manœuvre de recul d'équipement mobile présentant les avantages, les limites et les coûts de chaque technologie disponible. Ce document devra permettre à la CNESST d'évaluer la nécessité d'un projet de recherche sur un système en particulier.

Le présent rapport d'expertise traite donc de l'état de l'art portant sur les technologies de détection de personnes applicables aux chantiers de construction. Au vu de la grande mobilité des engins et des équipements mobiles déployés sur les chantiers de construction et de la variété des solutions commercialement disponibles permettant de réduire le risque de collision entre les travailleurs piétons et les engins mobiles, il a été jugé préférable de présenter l'ensemble des technologies et de ne pas se restreindre seulement aux manœuvres de recul.

Dès lors, les résultats des recherches comprennent les normes et les réglementations en vigueur, les majeures technologies de détection de personnes à proximité des engins mobiles, les principaux travaux accomplis sur cette question dans les centres de recherche en santé et en sécurité du travail et une liste exhaustive des systèmes commercialement disponibles pour les équipements utilisés en construction. La portée, les limites de chacune des technologies, les différents systèmes commerciaux et l'état actuel des connaissances ont été par la suite discutés pour ainsi permettre de mieux clarifier la direction d'éventuels projets de recherche sur cette thématique.

2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

Le taux élevé de décès et d'accidents graves dans l'industrie de la construction reste une préoccupation majeure des différents paliers gouvernementaux, des experts en santé et en sécurité du travail et des chercheurs de ce domaine à travers le monde (Awolusi, Marks et Hallowell, 2018). Selon les statistiques publiées aux États-Unis, le taux d'accidents mortels dans l'industrie de la construction est supérieur à la moyenne nationale dans cette catégorie par rapport à toutes les industries (Occupational Safety and Health Administration [OSHA], 2017). En une seule année 2014, sur un total de 4386 décès de travailleurs dans le secteur privé aux États-Unis, 899 ont été recensés dans le secteur de la construction, ce qui indique que plus d'un décès de travailleurs sur cinq est lié à la construction (U.S. Department of Labor, 2016). En raison des environnements de travail dangereux sur les chantiers de construction, les travailleurs sont souvent exposés à des risques potentiels pour la sécurité et la santé tout au long du processus de construction (Seo, Han, Lee et Kim, 2015). Parmi les risques potentiels pour la santé et la sécurité des travailleurs de la construction, la collision entre les équipements et les engins mobiles et les travailleurs piétons à proximité de la machine est particulièrement à souligner (OSHA, 2017). Selon le dépôt des données de la CNESST, la distribution absolue et relative du nombre annuel moyen de cas, de jours indemnisés et de débours totaux pour les lésions professionnelles avec perte de temps indemnisée associées aux machines mobiles dans le secteur de construction entre les années 2006 et 2015 montre une moyenne annuelle de 127 lésions, plus de 23 000 jours indemnisés et plus de trois millions dollars de débours totaux.

Compte tenu de la forte proportion d'accidents survenant dans la construction, les entreprises de ce secteur cherchent constamment de nouvelles stratégies pour promouvoir la sécurité des travailleurs (Demirkesen et Arditi, 2015). Malgré l'adoption des procédures et des programmes de sécurité et l'utilisation des moyens d'avertissement comme les alarmes sonores, le nombre d'accidents liés à la collision avec des engins mobiles demeure élevé, car les stratégies de sécurité prévues ne peuvent pas être généralisées à tous les chantiers et à tous types d'opérations (Awolusi *et al.*, 2018). En effet, les différents engins mobiles déployés sur un chantier, dont les pièces articulées se déplacent rapidement, présentent des risques qui varient en fonction de la situation et du lieu où se trouve le travailleur. De plus, la nature dynamique et les espaces confinés de l'environnement d'un chantier de construction exigent souvent que les travailleurs soient à proximité des machines (Barata et da Cunha, 2019). En outre, les équipements mobiles fréquemment utilisés dans la zone de travaux sont très variés et changent d'une opération à l'autre (Han, 2019).

Une étude réalisée sur les décès dus au manque de la visibilité liés aux équipements de construction a pu constater que les équipements mobiles œuvrant dans le sens inversé par rapport à leur fonction de base imposent un taux d'accidents beaucoup plus élevé que les équipements en mouvement habituel ou travaillant d'une manière immobile (Hinze et Teizer, 2011). Étant donné que l'angle mort peut varier en fonction du modèle d'équipement, l'étude de diverses configurations et des mesures d'angle mort sont nécessaires afin de minimiser le risque de collision avec les travailleurs piétons à proximité des machines (Han, 2019). Cependant, comme les travailleurs sont généralement très proches des machines dans des espaces confinés, une précision de localisation élevée est cruciale pour assurer leur protection tout en minimisant les alarmes intempestives (Esfahan, Du, Anumba et Razavi, 2017; Han, 2019). En effet, dans de nombreux cas, le simple fait de connaître la proximité d'un travailleur peut être insuffisant. Pour assurer une protection plus efficace, il serait avantageux de connaître la position exacte du

travailleur en temps réel par rapport à des pièces spécifiques d'un équipement mobile (Marks, E. et Teizer, 2012).

Compte tenu de la nature transitoire et dynamique d'un chantier de construction et de la variété des équipements déployés, les responsables du chantier doivent donc être en mesure de s'adapter rapidement au changement en capturant, stockant et diffusant efficacement les nouvelles stratégies de prévention des risques de blessure (Hallowell, 2011; Seo *et al.*, 2015). Par conséquent, les technologies qui ont joué un rôle majeur dans l'automatisation et l'amélioration des processus de construction peuvent être exploitées pour accroître les niveaux de sécurité sur les chantiers de construction (Cheng, Tao, Migliaccio, Teizer et Gatti, 2012; Seo *et al.*, 2015).

Afin de répondre à ces problématiques, des systèmes de détection de proximité et d'alerte en temps réel capables de prévenir les travailleurs piétons et les opérateurs d'équipement mobiles en cas de proximité dangereuse ont été mis au point par des groupes de recherche industriels et académiques (Antwi-Afari *et al.*, 2019). Grâce au progrès des technologies de détection et de géolocalisation sans fil (Antwi-Afari *et al.*, 2019; Barata et da Cunha, 2019), de nombreux systèmes ont été mis sur le marché au cours des dernières années. Le présent rapport fournit une liste de divers systèmes disponibles et analyse les technologies sur lesquelles ils sont basés.

3. OBJECTIFS DES TRAVAUX

Afin de diminuer le nombre encore trop important d'accidents de personnes travaillant à proximité des équipements mobiles dans le secteur de la construction malgré les progrès techniques dans la conception des matériels et des formations dispensées auprès des opérateurs, la CNESST a demandé à l'IRSST de réaliser un rapport d'expertise sur les différents systèmes de détection de proximité et d'analyser les avantages ainsi que les limites de chaque système.

Afin de répondre à cette requête, le présent rapport dresse un état des connaissances des technologies de détection permettant de contribuer à la prévention des collisions entre les équipements mobiles et les piétons. Il présente une liste de divers systèmes disponibles selon divers secteurs industriels et discute plus en détail les systèmes dédiés aux équipements mobiles dans le secteur de la construction. Le rapport analyse aussi la portée, les limites et le potentiel d'application de diverses technologies dans le domaine de la construction.

4. MÉTHODOLOGIE

Afin de mener à bien cette expertise, les recherches se sont concentrées sur les dispositifs de détection qui permettent à la fois de détecter automatiquement des risques de collisions avec les piétons ou les obstacles statiques ou mobiles et d'avertir le conducteur ou les travailleurs piétons à l'aide d'alertes sonores, visuelles ou vibratoires (Institut National de Recherche et de Sécurité [INRS], 2015). Il est à noter que les systèmes d'aide visuelle de type caméra-écran n'ont été retenus que s'ils étaient associés à un système de détection de proximité.

Dans un premier temps, une revue des études antérieures a permis de réunir les connaissances sur les technologies de détection de proximité et les dernières avancées réalisées dans le cadre de travaux de recherche. Des mots clés tels que, *proximity detection system*, *proximity detection alert*, et *collision avoidance system in construction* ont été utilisés afin d'orienter les recherches sur les études effectuées depuis les dix dernières années. Des bases de données comme *ScienceDirect*, *Web of Science* et *Scopus* et des moteurs de recherche tels que *Google Scholar* ont été prospectés. Au vu du temps imparti à cette expertise, seulement les articles de revue de littérature sur les technologies de détection de proximité ont été retenus. Par ailleurs, les rapports des travaux de recherche publiés par des centres de recherche en santé en et sécurité du travail comme INRS, NIOSH, IFA, BAUA, CSIRO et d'autres organismes concernés ont aussi été consultés. À partir des articles et des rapports examinés, une synthèse des diverses technologies de détection de proximité pour les équipements mobiles a pu être établie.

Les mêmes mots clés que ceux utilisés pour la recherche sur les études antérieures ont été employés pour une recherche sur internet afin d'identifier les manufacturiers et les fournisseurs des systèmes de détection de proximité pour les équipements mobiles dans la construction et les secteurs connexes tels que les mines, les travaux publics, la collecte et le tri des déchets et la manutention par chariots élévateurs dans les ateliers manufacturiers et la logistique. Ces secteurs emploient soit des équipements très semblables au domaine de la construction, soit ils sont confrontés aux mêmes problématiques de santé et de sécurité relatives aux collisions entre les piétons et les équipements mobiles. Les mécanismes de fonctionnement des différents systèmes ont été répertoriés en utilisant les informations disponibles sur les fiches techniques et les sites internet de fabricants et des distributeurs. Afin de collecter des informations complémentaires, des appels téléphoniques et des vidéoconférences ont été organisés avec des fabricants et des distributeurs qui ont bien voulu répondre aux questions sur le fonctionnement et les aspects techniques de leurs systèmes. Ces recherches ont permis de répertorier les différents systèmes disponibles sur le marché selon la technologie employée et le domaine d'application.

Finalement, en considérant les principes de fonctionnement et les caractéristiques de la détection de chaque système, le potentiel d'application de telles technologies dans l'objectif de réduire les risques de collision entre les équipements mobiles et les personnes piétonnes dans les chantiers de construction a été évalué. Ainsi, quelques avenues de recherche ont été proposées afin de mieux cerner la portée et les limites de tels systèmes dans un milieu de travail.

5. RÉSULTATS

Les recherches sur les études antérieures et les systèmes disponibles dans le commerce ont permis d'identifier des normes et réglementations sur l'utilisation des systèmes de détection de proximité dans certains secteurs industriels. Ces normes sont présentées dans la présente section.

À partir des résultats des recherches, les principes technologiques de déploiement des systèmes de détection de proximité sont énoncés. Sont aussi discutés les différentes catégories de technologies pour bâtir des systèmes de détection applicables au domaine de la construction, les spécificités techniques, les avantages et les limites de différentes technologies.

De plus, ce travail a permis de mieux connaître les majeurs travaux de recherche réalisés sur cette thématique dans les centres de recherche en santé et sécurité du travail. Ces efforts sont aussi présentés dans la présente section.

Depuis les recherches réalisées sur les systèmes commercialisés, une liste de manufacturiers de systèmes de détection de proximités pour les véhicules dans les milieux de travail à risque a été établie. En s'appuyant sur cette liste et l'analyse des données techniques de chaque produit, les compagnies recensées ont été classées, selon les différentes catégories de technologie de détection, tout en précisant leur principe de fonctionnement et leurs secteurs industriels respectifs. Les systèmes commercialisés de détection destinés au domaine de la construction sont par la suite présentés en détaillant leurs composants et leurs caractéristiques techniques respectifs.

Les produits commercialisés qui sont destinés à d'autres secteurs que la construction sont présentés dans la partie Annexe du présent rapport. Ces systèmes sont classés selon la catégorie de technologies de détection sur lesquelles ils sont basés.

5.1 Normes en vigueur

Les recherches pour cette expertise ont pu mettre en évidence l'entrée en vigueur de lois sur l'obligation de l'utilisation des systèmes de détection de proximité dans l'industrie minière.

Afin de renforcer la protection des mineurs en réduisant le risque d'accident ou de collision dans les mines souterraines, la règle définitive publiée en janvier 2015 par l'administration de la sécurité et de la santé dans les mines aux États-Unis (MSHA) oblige les exploitants des mines de charbon souterraines à équiper les machines d'extraction continue (à l'exception des machines d'exploitation minière continue intégrale) de systèmes de détection de proximité (Mine Safety and Health Administration [MSHA], 2015). Le texte de cette réglementation comprend les machines concernées, les exigences pour un système de détection de proximité, les vérifications d'un système de détection de proximité avant son déploiement et son utilisation et les procédures pour la certification et l'enregistrement des produits proposés. Selon cette norme, les machines d'extraction continue fabriquées aux États-Unis après le 16 mars 2015 doivent satisfaire aux exigences citées dans le texte ([MSHA], 2015).

Depuis le février 2015, l'avis gouvernemental numéro 125 en Afrique du Sud apporte une rectification aux règlements relatifs aux machines et aux équipements en vertu de la loi sur la santé et la sécurité dans les mines en exigeant que toutes les machines mobiles souterraines

motorisées qui n'ont pas de sentiers définis doivent être équipées de moyens permettant de détecter automatiquement la présence de piétons à proximité (Department of Mineral Resources, 2015).

5.2 Principes technologiques des systèmes de détection de proximité

Des dispositifs de détection de proximité pour les équipements mobiles dans le cadre de la réduction des risques liés aux collisions avec les travailleurs piétons peuvent être déployés selon deux principes technologiques : les systèmes centralisés et les systèmes embarqués.

5.2.1 Systèmes centralisés

Le système repose sur un contrôle permanent de la localisation de tous les véhicules et des personnes présentes sur le site du travail. Il fait appel à des technologies typiques de géolocalisation (GPS, IMS, etc.) et leur association, et exige qu'un marqueur de localisation soit installé sur tous les objets présents. En calculant la localisation exacte des objets, le système permet de créer des périmètres de sécurité autour des équipements mobiles et des piétons et d'établir plusieurs zones de proximité. Si l'équipement mobile ou le piéton franchissent les zones de proximité prédéfinies autour de l'un de l'autre, le système pourra avertir le conducteur et le piéton à l'aide d'alarmes sonores et visuelles (Gheisari et Esmaeili, 2019; Kanan, Elhassan et Bensalem, 2018).



Figure 1 Exemple de système centralisé de détection de proximité pour une mine à ciel ouvert (Source : GE-Transportation).

Un tel système nécessite une surveillance du site de travail avec des outils informatiques et une analyse de quantités importantes de données en temps réel dans un central. Comme un système centralisé requière l'installation d'une infrastructure importante, il est en effet destiné à de grands sites de travail qui ne connaissent pas de grands changements de configurations après le début des travaux. En général, les systèmes de détection de proximité centralisés font partie d'une structure plus globale qui surveille le bon déroulement des travaux et la gestion adéquate du site de travail (Han, 2019; Kanan *et al.*, 2018).

5.2.2 Systèmes embarqués

Le système repose sur des technologies à base de capteurs embarqués de détection de proximité qui peuvent être associés à des outils d'aide visuelle de type caméra-écran. Il est possible d'associer plusieurs technologies de capteurs de détection pour le même système. Alors que le système est basé sur la détection de la proximité du piéton ou de l'engin, la collecte des données est réalisée d'une manière unilatérale (destinée au conducteur) ou bilatérale (échange de données entre le détecteur du véhicule et le marqueur du piéton).

Un tel système permet d'établir plusieurs zones de proximité autour de l'équipement mobile ou du piéton. Si l'un affranchit les zones de proximité prédéfinies autour de l'autre, le système peut avertir le conducteur et le piéton à l'aide des alarmes sonores et visuelles. Certaines technologies de capteurs de détection permettent d'identifier plusieurs obstacles et de travailleurs piétons en même temps. Comme le système est embarqué sur l'équipement mobile ou le piéton, il peut être utilisé dans des petits comme de grands sites de travail.

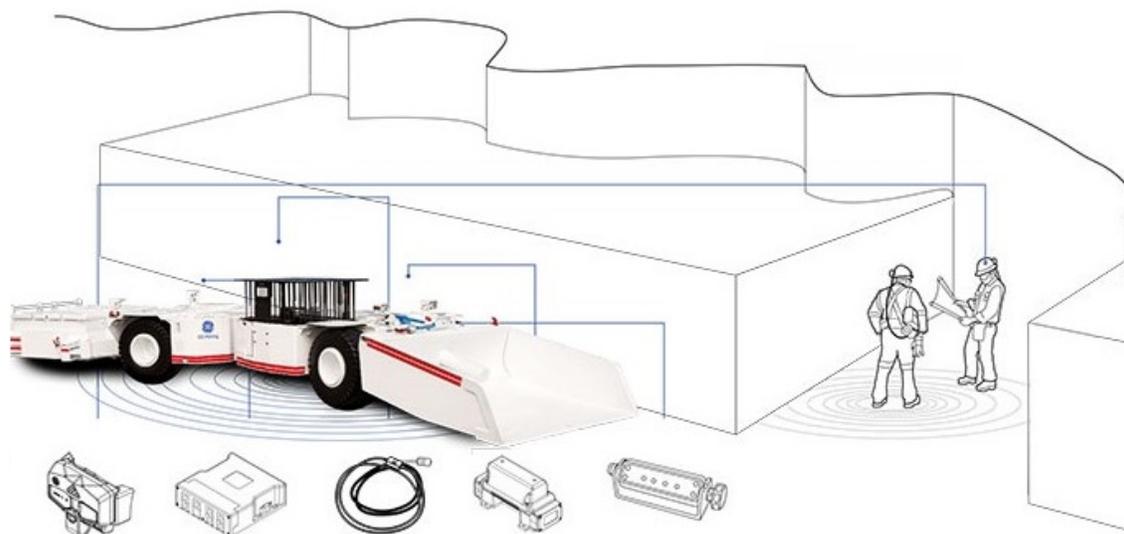


Figure 2. Exemple de système embarqué de détection de proximité pour une mine souterraine (Source : GE-Transportation).

5.2.3 Zone de proximité autour de l'équipement mobile

Les systèmes de détection de proximités centralisés et certains systèmes embarqués offrent la possibilité de créer d'une à plusieurs zones de proximité autour des équipements mobiles. Dans une zone d'opération de l'équipement appelé aussi la « zone sécurisée », les travailleurs piétons peuvent circuler sans aucun danger. Dans une deuxième zone appelée « zone de prudence », si la présence d'un piéton est détectée, une alerte est immédiatement envoyée au conducteur et dans certains systèmes, le piéton sera aussi averti. Si malgré les alertes envoyées lors de la détection d'un piéton dans la zone de prudence, le conducteur ne ralentit ou n'arrête pas l'équipement mobile ou le piéton ne quitte pas cette zone, le système peut arrêter l'équipement.

Certains systèmes peuvent aussi établir des zones extrêmement proches de l'équipement, dites « zones d'arrêt ». Dès que la présence d'un piéton est détectée dans cette zone, l'engin mobile est mis à l'arrêt. L'équipement ne redémarrera pas tant que le piéton n'est pas sorti de la zone.



Figure 3. Exemple de création de plusieurs zones de détection de proximité pour un équipement de mine souterraine (Source : Matrix Design Group LLC).

5.3 Catégories de technologies de détection de proximité à embarquer sur les équipements mobiles

L'application d'une infrastructure lourde, comme celle nécessaire à implémenter un système de détection de proximité centralisé, ne semble pas très appropriée à la prévention de collision entre les équipements mobiles et les piétons dans la construction. En effet, les chantiers de construction possèdent une nature transitoire et dynamique où différents équipements se déplacent quotidiennement et de nombreux intervenants et travailleurs entrent et sortent. De plus, les projets de construction sont réalisés en plusieurs phases, ce qui implique l'utilisation de divers types d'équipements pour les différentes opérations. Les systèmes embarqués basés sur des capteurs de détection s'avèrent donc plus adaptés aux particularités des travaux sur un chantier de construction (Antwi-Afari *et al.*, 2019). Ainsi, la présente section discute les technologies de détection de proximité, à partir desquelles des systèmes de prévention de collision entre les équipements mobiles pour la construction et les travailleurs piétons sont conçus.

5.3.1 Détection de proximité par les technologies de radiofréquence

Ces types de systèmes utilisent la détection du signal radio réémis par un marqueur radioélectrique présent dans la zone d'émission d'une antenne émettrice. Ils emploient des balises composées de plusieurs antennes émettrices d'onde radio qui sont installées sur l'engin mobile. Dans certains cas, des balises peuvent aussi être déployées et réparties sur le site de travail. Le travailleur piéton ou tout autre objet à détecter sont équipés par un marqueur radioélectrique sous forme d'un boîtier, un badge ou une étiquette. Afin de prévenir un risque de collision, une alarme sonore ou visuelle est déclenchée lorsqu'un signal est reçu de la part d'un marqueur présent dans la zone d'émission des ondes ([INRS], 2015).

5.3.1.1 Identification par radiofréquence

L'examen des technologies portables et sans-fils existantes montre que l'identification par radiofréquence (RFID) est le système le plus couramment utilisé pour la détection de proximité dans divers secteurs industriels (Antwi-Afari *et al.*, 2019). Il repose sur la projection d'ondes radio pour la transmission de données et la récupération et l'archivage de données de manière sans fil afin d'identifier le statut des travailleurs ou des objets. Il comprend deux composants : un marqueur souvent sous forme d'une étiquette d'identification unique installée sur l'objet à identifier et un lecteur qui détecte la fréquence unique transmise ou l'identifiant d'un marqueur (Awolusi *et al.*, 2018). Les marqueurs et les lecteurs utilisent des fréquences radio et des protocoles prédéfinis pour envoyer et recevoir des données entre eux.

Les étiquettes sont composées d'une micropuce pouvant stocker jusqu'à 2 kilo-octets de données et d'une antenne radio. Il existe deux types d'étiquettes : des tags actifs et des tags passifs. Alors que le tag actif transmet en permanence des informations sur sa situation, le tag passif ne s'active que lorsque le lecteur lui transmet des signaux (Chae et Yoshida, 2010). En effet, un tag passif n'intègre pas d'émetteur radiofréquence, mais il utilise l'onde issue du lecteur RFID pour alimenter son circuit électronique intégré (Lu, Huang et Li, 2011). D'autre part, un lecteur RFID est constitué de différents composants; comprenant une antenne, un émetteur-récepteur, une alimentation, un processeur et parfois une interface, afin de se connecter à un serveur (Alarifi *et al.*, 2016). La technologie RFID utilise des ondes radio qui peuvent être classées comme basses, hautes et ultra hautes fréquences allant de 125 kHz à 5,875 GHz (Awolusi *et al.*, 2018).



Figure 4. Illustration schématique d'un système de détection de proximité basé sur l'identification par radiofréquence (Source : Zonesafe).

Le tableau 1 présente la portée effective de différents types de marqueur RFID. Bien que des méthodes de positionnement puissent utiliser la technologie RFID, la détection de proximité par l'entremise de la détection de la présence de marqueur RFID demeure l'application de prédilection de cette technologie (Alarifi *et al.*, 2016).

Tableau 1. La portée effective de différents types de marqueur RFID (Awolusi *et al.*, 2018)

Type de marqueur RFID	Portée effective
Passive basse fréquence	30 cm
Passive haute fréquence	1 m
Passive ultra haute fréquence	3 -5 m
Active	100 m

5.3.1.2 Onde radiofréquence à bande ultra-large

La technologie à bande ultra-large (ULB) est une technique de modulation radio qui est basée sur la transmission d'impulsions de très courte durée, souvent inférieure à la nanoseconde. Ainsi, la bande passante peut atteindre de très grandes valeurs de largeur de bande qui sont de l'ordre de 250 MHz ou plus (Awolusi *et al.*, 2018). Dans certains systèmes, la largeur de bande peut même être supérieure à 500 MHz (Alarifi *et al.*, 2016). En effet, il s'agit d'un canal de communication qui diffuse des informations sur une large partie du spectre de fréquences. Cela permet aux émetteurs ULB de transmettre de grandes quantités de données tout en consommant peu d'énergie de transmission (Shahi, Aryan, West, Haas *et Haas*, 2012).

Cette technologie peut également être utilisée pour le positionnement des objets mobiles. Des balises ULB placées sur les objets émettraient des données, qui seraient reçues par des récepteurs qui sont installés sur le véhicule ou qui sont répartis dans l'environnement de travail (Awolusi *et al.*, 2018). Ces derniers évaluent la différence de temps d'arrivée des signaux radiofréquences, afin d'obtenir la distance entre le point de référence et la cible (Alarifi *et al.*, 2016). L'émission d'ondes sous forme d'impulsion de très courte durée permet de réduire les erreurs lors de la détermination des temps de propagation. En effet, la transmission des données sur une large bande passante rend l'ULB moins sujette aux interférences de signal et facilite son passage à travers les murs par rapport à la technologie RFID (Cheng, T, Venugopal, Teizer *et Vela*, 2011).

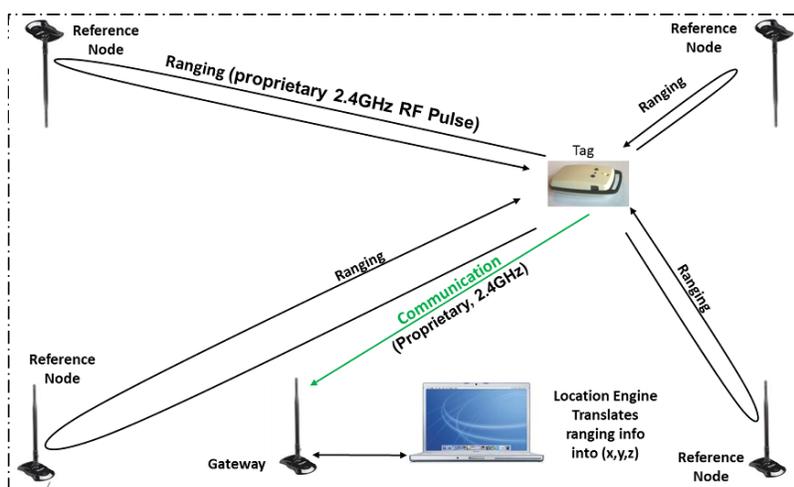


Figure 5. Illustration schématique d'un système de détection de proximité basé sur les ondes radiofréquence ULB (Source : Essensium).

Tableau 2. Caractéristiques des technologies de détection de proximité par la radiofréquence (Alarifi et al., 2016; Antwi-Afari et al., 2019; Awolusi et al., 2018; Choe, Leite, Seedah et Caldas, 2014; Han, 2019)

Détection	<ul style="list-style-type: none"> - La zone est définie par un volume de forme variable qui dépend des conditions des antennes émettrices. - La dimension de la zone dépend de la puissance d'ondes émises et la sensibilité de réception du marqueur. - Il est possible de régler les dimensions de la zone de détection (en fonction du nombre, du type et de la position des antennes)
Performances	<ul style="list-style-type: none"> - Il est possible de détecter des personnes allongées sur le sol ou en position latérale. - La capacité de détection dépend de l'aptitude à détecter la présence d'un marqueur dans le volume de détection paramétré. - La couverture de la zone de danger dépend du nombre d'antennes et leur réglage.
Matériel spécifique	<ul style="list-style-type: none"> - Les marqueurs sont sous la forme de boîtier à porter à la ceinture ou dans une poche de l'ÉPI.
Données techniques	<ul style="list-style-type: none"> - La portée minimale est de quelques cm à 30 m. - Le temps de réponse est inférieur à 0,5 s pour la plupart des systèmes. - Les ondes dans la technologie RFID pénètrent des objets solides non métalliques et ne nécessitent pas la présence d'une ligne de mire entre l'émetteur et le récepteur (le marqueur). - La technologie ULB offre un positionnement de haute précision, même en présence de trajets multiples importants. Les ondes traversent efficacement les murs, les équipements et tout autre obstacle et n'interfèrent pas avec les systèmes RF existants dans l'environnement.
Limites d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> - Les solutions disponibles sont adaptées à des vitesses réduites. - Il est impossible de faire varier la géométrie de la zone de détection. - La présence d'objets métalliques peut induire des fluctuations des dimensions de la zone. - Bien que l'ULB soit moins sensible aux interférences, il reste soumis aux interférences causées par des matériaux métalliques. - Les ondes RFID peuvent affecter d'autres ondes RF présentes dans l'environnement de travail. - Le risque de non-détection est présent dans les cas suivants : <ul style="list-style-type: none"> • La présence d'obstacles métalliques pouvant déformer les ondes d'émission ou retransmises • Les champs électromagnétiques pouvant perturber la détection des marqueurs

5.3.2 Détection de proximité par les technologies de radar

Les systèmes de détection de proximité par radar exploitent la réflexion des ondes électromagnétiques sur les obstacles rencontrés sur leur parcours. Le système installé sur l'équipement mobile envoie des ondes de 300Mhz à 30Ghz qualifiées d'hyperfréquences ou de micro-ondes. La présence d'un objet est mise en évidence par la réception par le système d'un signal réfléchi ([INRS], 2015). L'analyse du signal réfléchi permet de déterminer la distance séparant le radar et l'objet, ainsi que sa vitesse de déplacement. Afin de prévenir un risque de collision, une alarme sonore ou visuelle est déclenchée lorsqu'un obstacle ou un objet mobile se trouve à une distance déterminée (Ruff, T., 2006). Les systèmes de détection à base de capteur radar comprennent trois principaux types :

- Radar pulsé : Il s'agit d'émettre des séries d'impulsion de courte durée et de mesurer le temps écoulé entre l'émission et la réception des ondes.
- Radar à onde entretenue : Le système émet continuellement une onde de fréquence fixe et calcule la différence de fréquence entre signal émis et réfléchi par un objet pour déterminer sa vitesse relative. Il permet de distinguer les objets fixes et mobiles et de déterminer le sens de déplacement de l'objet.
- Radar à onde entretenue et à modulation de fréquence : Le système est basé sur une émission continue d'une onde associée à la modulation de fréquence qui permet de déterminer la vitesse, la direction de déplacement et la distance ([INRS], 2015).



Figure 6. Exemple d'un système de détection de proximité par radar (Source : Preco Electronics).

Tableau 3. Caractéristiques des technologies de détection de proximité par radar (Cho, Yang et Park, 2017; Institut National de Recherche et de Sécurité, 2015; Lee, Suh, Baek et Choi, 2017)

Détection	<ul style="list-style-type: none">- Cette zone est théoriquement liée à la géométrie de l'antenne et de la forme conique des ondes émises.- La grandeur de la zone dépend aussi de la nature des obstacles présents dans le champ d'émission des ondes.
Performances	<ul style="list-style-type: none">- Elle dépend de l'aptitude de l'objet à détecter et à retourner tout ou partie de l'onde émise.- La surface, la forme, l'orientation et la nature de la cible peuvent influencer la capacité de la détection.
Matériel spécifique	<ul style="list-style-type: none">- Le système peut être constitué d'une à plusieurs unités d'émission-détection des ondes.
Données techniques	<ul style="list-style-type: none">- La mise en œuvre de plusieurs capteurs unitaires permet d'assurer une meilleure détection des zones avec des géométries particulières.- La dimension de la zone de détection dépend du type de radar utilisé.- La portée minimale est de de quelques cm à 30 m.- Le temps de réponse typique des systèmes à base de radar est inférieur à 0,5 s.
Limites d'utilisation	<ul style="list-style-type: none">- La géométrie de la zone de détection n'est pas réglable pour un système doté d'un capteur individuel.- Certains obstacles présents dans l'environnement peuvent dévier ou masquer les ondes envoyées par le système.- La morphologie, l'orientation et la vitesse de l'objet peuvent créer des fluctuations dans les ondes réfléchies et induire des erreurs de précision de mesure.- Le système détecte difficilement les déplacements lents des objets ou les personnes.

5.3.3 Détection de proximité par les technologies à ultrasons

Ce type de système de détection de proximité se base sur la réflexion d'ondes ultrasonores sur les obstacles. Le système placé sur l'équipement mobile envoie une impulsion ultrason avec des intervalles fixes et des fréquences ultrasoniques entre 16 kHz et 1 GHz (Awolusi *et al.*, 2018). Un transducteur est aussi utilisé afin d'éviter la confusion entre l'impulsion émise et la réflexion reçue. Des transducteurs piézo-électriques sont utilisés lorsque des impulsions à fréquence élevée sont utilisées. Des transducteurs à membrane vibrante sont utilisés dans le cas des impulsions à basse et moyenne fréquences ([INRS], 2015). Une alarme sonore ou visuelle peut-être déclenchée dès la réception d'une onde réfléchi correspondant à un obstacle.

Les systèmes de détection de proximité à ultrasons utilisent l'air comme moyen de propagation bien que les ondes ultrasoniques puissent aussi se propager dans certains matériaux de construction. Bien que la portée des ondes ultrasoniques soit relativement courte, néanmoins elles n'interfèrent pas avec les ondes électromagnétiques présentes dans l'environnement de travail (Alarifi *et al.*, 2016). Ces types de systèmes consomment moins d'énergie, ils sont de conception simple et relativement peu coûteuse en comparaison avec d'autres systèmes de détection de proximité (Awolusi *et al.*, 2018). Ils sont plutôt considérés comme une solution adaptée pour la détection lors des déplacements à vitesse réduite ([INRS], 2015).

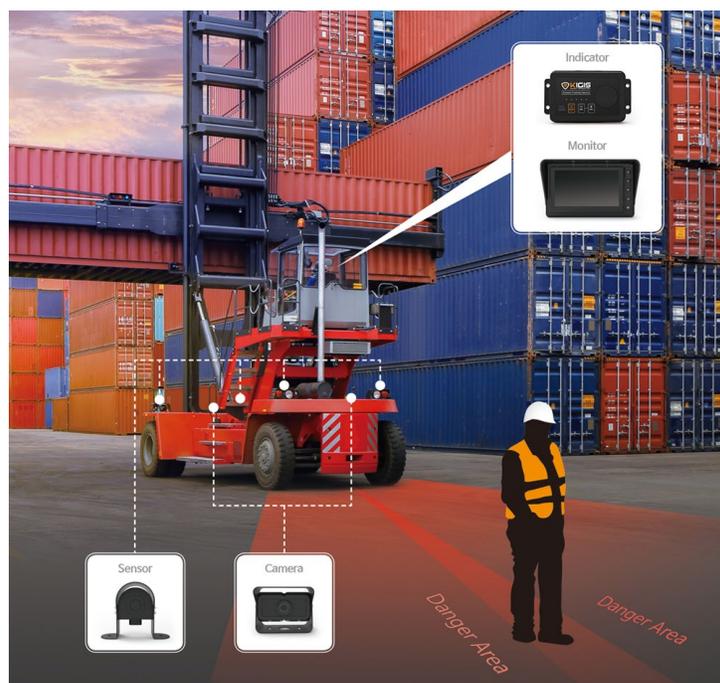


Figure 7. Exemple d'un système de détection de proximité à ultrasons (Source : Kigistec).

Tableau 4. Caractéristiques des technologies de détection de proximité à ultrasons (Alarifi *et al.*, 2016; [INRS], 2015; Awolusi *et al.*, 2018; Bhagyashree, Singh, Kiran et Padmini, 2019)

Détection	<ul style="list-style-type: none"> - Pour un capteur unique, la zone théoriquement conique de détection correspond à la configuration des ondes émises. - La surface active du transducteur détermine la configuration des ondes émises. - Il est possible de régler la dimension de la zone de détection.
Performances	<ul style="list-style-type: none"> - La capacité de détection du transducteur dépend de la capacité de l'objet à réfléchir une partie suffisante des ondes envoyée. - L'intensité des ondes réfléchies dépend de l'aptitude de réflexion de l'objet et sa distance entre le transducteur et l'objet à détecter. - La capacité de détection peut fortement être influencée par les caractéristiques physiques de l'objet (l'absorption, la diffraction et la réflexion) et son orientation. - L'utilisation de plusieurs capteurs unitaires à ultrason optimise la capacité de faire une distinction entre les objets et les personnes.
Matériel spécifique	<ul style="list-style-type: none"> - Mis à part les unités de détection, l'unité de contrôle électronique du système comprenant un transducteur joue un rôle important dans l'optimisation de la détection.
Données techniques	<ul style="list-style-type: none"> - La portée minimale est de quelques cm à 10 m. - Le temps de réponse est généralement inférieur à 0,3s. Toutefois, les temps de réponse de certains capteurs ultrasons sont plus lents. Ces capteurs de proximité à ultrasons ont besoin de temps pour que le transducteur arrête de résonner après chaque rafale de transmission avant de pouvoir recevoir les échos renvoyés.
Limites d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> - Malgré une bonne résistance au bruit de fond, les capteurs à ultrasons risquent de réagir de manière erronée à certains bruits forts. - La densité et la consistance des matériaux (murs solides), ainsi que les modifications de l'environnement, telle que la pression et la turbulence de l'air peuvent fausser la lecture. - Il peut y avoir une perte de signal en raison d'une obstruction ; de faux signaux à cause des reflets erronés ; et des interférences provoquées par des sons à haute fréquence. - Les dispositifs utilisés sont souvent sensibles aux salissures importantes.

5.3.4 Détection de proximité par les technologies de traitement d'image

Les technologies basées sur l'analyse d'image, parfois appelées méthodes optiques, comprennent les technologies basées sur la capture d'images par une caméra et l'analyse des images par un ordinateur (Seo *et al.*, 2015). Des caméras installées sur divers côtés de l'équipement mobile enregistrent en permanence des images dans leur champ de vision et fournissent des éléments nécessaires à l'ordinateur pour décider de la présence ou de l'absence des objets ou des personnes dans la scène filmée (Martinez, Al-Hussein et Ahmad, 2019). La prise de décision est basée sur des algorithmes d'analyse d'images qui fonctionnent en 2 étapes :

- Présélectionner rapidement par filtrage les parties de l'image qui représente potentiellement un piéton qui correspond à une couleur homogène ou un ensemble de points situés dans un même plan,
- focaliser les outils de calcul sur chacune des sections d'images retenues à l'étape précédente ([INRS], 2015).

Par la suite, l'algorithme modélise le contenu de l'image sélectionnée (contour, couleur, texture) et le compare aux images prises au préalable. En cas de détection d'une personne ou d'un objet à proximité de l'équipement, une alarme sonore ou visuelle est déclenchée (Son, Seong, Choi et Kim, 2019).

Différents types de caméras tels que les caméras omnidirectionnelles ou les caméras tridimensionnelles peuvent être utilisés pour la conception de tels systèmes. Cependant, leurs performances varient en fonction de la quantité d'informations pouvant être extraites de leurs images (Alarifi *et al.*, 2016). Le succès des technologies basées sur l'analyse d'image repose sur différents facteurs, tels que : la capacité de détection, des actuateurs optimisés et miniaturisés, des débits de transmission de données élevés et des algorithmes de traitement d'image performants avec des capacités de calcul élevées (Son *et al.*, 2019).



Figure 8. Exemple d'un système de détection de proximité par traitement d'image appliqué au domaine de la construction (Source : Blackinktech)

Tableau 5. Caractéristiques des technologies de détection de proximité par traitement d'image (Institut National de Recherche et de Sécurité, 2015; Martinez et al., 2019; Son et al., 2019)

Détection	<ul style="list-style-type: none"> - La méthode de la définition de la zone de détection, ainsi que la distinction des personnes et des objets dépendent de la technologie employée. - Le champ de détection (de vision) dépend de la position de la caméra, de son orientation et des caractéristiques optiques. - La géométrie et les dimensions de la zone de détection sont ajustables en fonction de la technologie utilisée. - En fonction du nombre de caméras installées, plusieurs zones de détection peuvent simultanément être balayées par le même système.
Performances	<ul style="list-style-type: none"> - Pour une détection optimale, le corps de la personne doit être intégralement inclus dans la zone de détection. - La capacité de détection est influencée par plusieurs paramètres : <ul style="list-style-type: none"> • La résolution et la sensibilité du capteur, • La technologie d'acquisition d'image (image 3D, couleur, niveaux de gris, thermiques, etc.), • L'éclairage et l'encombrement du milieu de travail, • La méthode d'analyse d'image (contour, couleur, texture), • La capacité de distinction de l'algorithme.
Matériel spécifique	<ul style="list-style-type: none"> - La conception optimale de tels systèmes repose sur l'équilibre à trouver entre les temps de réponse (en raison de la complexité des calculs) et la précision et la performance du système.
Données techniques	<ul style="list-style-type: none"> - La portée minimum du système dépend de la technologie optique déployée. Elle peut varier de quelques centimètres à une dizaine de mètres. - Le temps de réponse varie d'une technologie d'imagerie et son algorithme à l'autre.
Limites d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> - L'efficacité du système peut être détériorée par certains paramètres de l'environnement de travail (la pluie, la neige, de fortes lumières, la poussière et la fumée). - La détection peut être perturbée par la posture de la personne, la similitude de la couleur de l'objet à détecter et celle du fond de l'image analysée. - Certaines techniques d'imagerie ne sont pas capables de distinguer une personne immobile ou sa posture des objets présents dans le champ de détection.

5.3.5 Détection de proximité par la technologie de balayage laser

Les systèmes de détection de proximité par le balayage laser utilisent la réflexion d'un faisceau laser infrarouge sur des objets à repérer ([INRS], 2015). Le système embarqué sur un équipement mobile émet une impulsion lumineuse vers une direction fixe à l'aide d'un mécanisme de miroirs tournants intégrés. Par la suite, l'impulsion est réfléchiée par des objets ayant un coefficient de réflexion assez élevé. Dès la réception des impulsions réfléchies, l'unité électronique du système mesure le temps entre l'émission de l'impulsion et la réception de la réflexion pour ainsi déduire la distance qui le sépare de l'objet (Gan et Zhang, 2018). Le système peut décaler les rayons de laser d'une valeur angulaire donnée. En procurant une nouvelle impulsion à travers un mécanisme répétitif, un balayage complet d'un secteur est assuré (Oh *et al.*, 2019). En fonction de la distance et de la position angulaire d'un objet balayé ([INRS], 2015), une alarme sonore ou visuelle est amorcée pour avertir le conducteur.

La plupart des systèmes opèrent par un balayage circconférentiel dans le sens latéral, toutefois, certains systèmes permettent de moduler la zone circulaire de balayage dans le sens vertical (Gan et Zhang, 2018; Oh *et al.*, 2019). Les systèmes de détection de proximité par le balayage laser présentent aussi l'avantage d'être opérationnels sur une large gamme de température allant de -30 °C à +50 °C ([INRS], 2015).

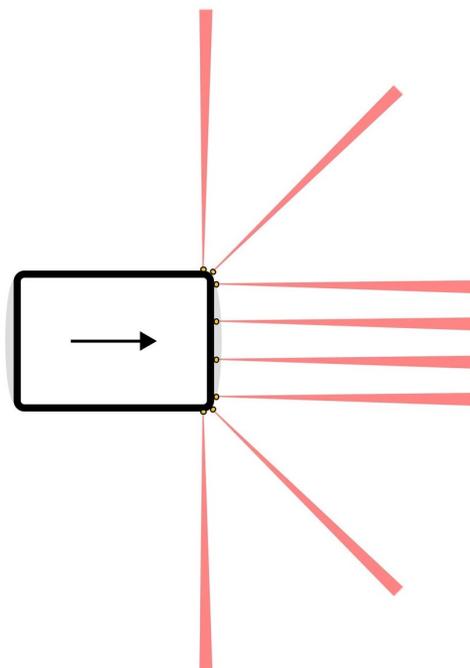


Figure 9. Illustration schématique (vue de dessus) d'un système de détection de proximité basé sur le balayage laser (Source : Terabee).

Tableau 6. Caractéristiques des technologies de détection de proximité par balayage laser (Gan et Zhang, 2018; Institut National de Recherche et de Sécurité, 2015; Oh et al., 2019)

Détection	<ul style="list-style-type: none"> - Une ou plusieurs zones de détection de dimensions précises peuvent être programmées avec le même système. - La zone de détection peut être programmée en fonction de la configuration du travail de l'équipement mobile avec des formes relativement complexes de zone. - Des zones de détection sont programmables afin de couvrir jusqu'à 180° de balayage circonférentiel.
Performances	<ul style="list-style-type: none"> - Les paramètres géométriques de l'objet à détecter tels que sa forme, sa taille et son orientation influencent grandement la capacité de détection du système. - Le coefficient de réflexion de l'objet à détecter, ainsi que sa distance avec le capteur du système influent la capacité de détection.
Matériel spécifique	<ul style="list-style-type: none"> - La résolution angulaire (l'angle séparant 2 émissions consécutives de faisceau lumineux) du système est un paramètre important afin d'assurer une détection optimale. - La sensibilité et le filtrage du capteur optique du système sont d'autres facteurs à paramétrer pour un repérage efficace des objets.
Données techniques	<ul style="list-style-type: none"> - La portée minimale varie de 0,5 à 20 mètres selon le réglage ou le type du système. - La portée maximale est d'environ 100 mètres. Cependant, de telles distances peuvent limiter même la réflectivité des objets à détecter. - Le temps de réponse de ces systèmes peut varier de l'ordre de millisecondes à quelques secondes.
Limites d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> - Les paramètres de l'environnement de travail (brouillard, poussière) peuvent affaiblir la réémission des faisceaux lumineux. - Il y a un risque élevé d'erreur de détection avec la présence de toute perturbation (neige, brouillard, pluie, fumée, poussière) sur le trajet des faisceaux. - La présence de lumière directe dans l'axe de l'optique du système ou la présence d'un obstacle peuvent induire une non-détection de la personne. - Des objets avec des coefficients de réflexion très faibles ou trop forts (des objets très sombres ou très réfléchissants) peuvent causer la non-détection de la cible. - Le système requiert un paramétrage délicat et permanent afin de réduire le risque de détections erronées.

5.3.6 Détection de proximité par la technologie électromagnétique

Les systèmes de détection de proximité par champ magnétique utilisent des générateurs de champs magnétiques installés sur l'équipement mobile pour établir des champs magnétiques autour de l'engin et des marqueurs dotés de capteurs portés par des piétons pour détecter la proximité de la machine (Awolusi *et al.*, 2018).

Cette technologie utilise un courant sinusoïdal modulé à une fréquence comprise entre 10 et 100 kHz qui circule dans un générateur constitué d'une bobine de fil métallique enroulée autour d'un noyau en ferrite pour établir le champ magnétique. Un capteur magnétique porté par le travailleur piéton détecte le signal magnétique et mesure la densité de flux magnétique sur trois axes orthogonaux. Une fois, les données envoyées au système, ces lectures sont utilisées pour calculer la magnitude totale de la densité de flux magnétique qui est ensuite utilisée pour estimer la distance de l'engin mobile (Awolusi *et al.*, 2018; Li, Carr et Jobes, 2012). Dès la détection d'un piéton équipé d'un marqueur dans la zone de proximité, le système émet un avertissement sonore ou visuel.

Un système de détection de proximité comprend généralement plusieurs générateurs qui, dans certains systèmes, sont alimentés en permanence et, dans d'autres, pulsés de manière séquentielle ou aléatoire. La présence de plusieurs générateurs permet aux systèmes de générer des champs magnétiques combinés pour couvrir tout l'espace autour de l'équipement (Li *et al.*, 2012; Li, Carr, *et al.*, 2019).

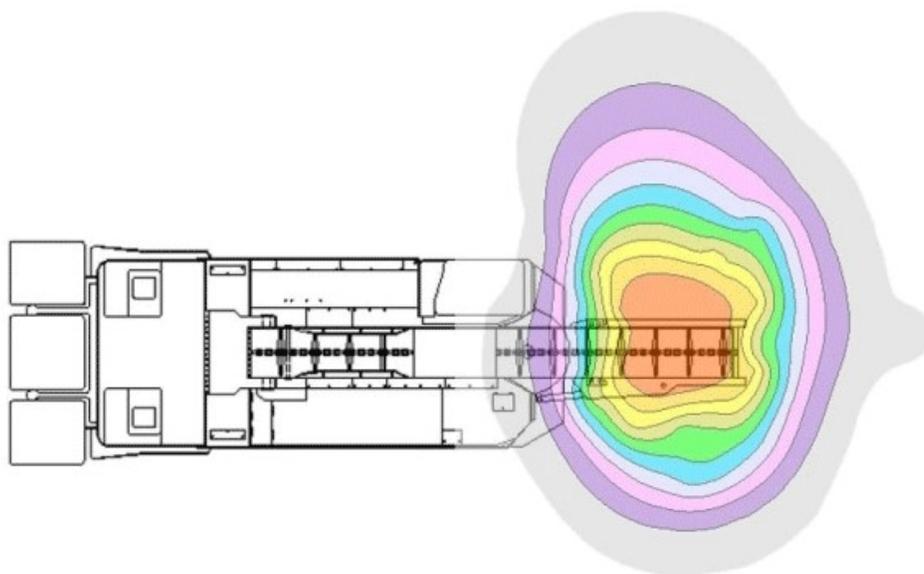


Figure 10. Illustration schématique (vue de dessus) d'un système de détection de proximité par champ magnétique (Source : NIOSH).

Tableau 7. Caractéristiques des technologies de détection de proximité par champ magnétique
(Li et al., 2012; Li, Carr, et al., 2019; Li, Smith, Carr et Whisner, 2019; Wu, Vibhute, Soh, Wood et Foong, 2017; Zhou, Li, Damiano, Carr et Noll, 2019)

Détection	<ul style="list-style-type: none"> - Les zones de détection de proximité sont définies à partir de la configuration des champs électromagnétiques. - Plusieurs zones de détection de dimensions variées peuvent être programmées avec le même système. - Les formes exactes et l'étendue des zones dépendent fortement de la configuration des générateurs et d'autres facteurs d'étalonnage du système. - Des zones avec formes complexes peuvent être constituées à partir de la combinaison des valeurs de seuil de densité de flux magnétique établie par plusieurs générateurs.
Performances	<ul style="list-style-type: none"> - Un champ magnétique stable est essentiel à la précision des calculs de proximité effectués par le système. - Il est possible de détecter des personnes avec différentes postures (assis, allongé, etc.). - Plusieurs personnes peuvent être détectées simultanément.
Matériel spécifique	<ul style="list-style-type: none"> - En fonction de la variation des opérations de l'équipement mobile et le déploiement des travailleurs piétons dans le milieu de travail, un étalonnage des paramètres des champs magnétiques est requis.
Données techniques	<ul style="list-style-type: none"> - La portée minimale est de 1 à 30 mètres selon le réglage des paramètres du générateur. - Le temps de réponse est généralement inférieur à 0,5 s.
Limites d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> - Les pièces métalliques présentes dans l'environnement et celles utilisées dans la conception de la machine elle-même peuvent modifier la distribution du champ magnétique. - Les pièces métalliques peuvent aussi modifier les paramètres électriques du système en altérant le courant de son générateur. - Les composants utilisés pour générer des champs magnétiques peuvent être influencés par les changements de température. Le courant électrique dans un générateur peut être influencé par les températures ambiantes et internes, ce qui modifie le champ magnétique. - Il est parfois difficile de créer des zones de proximités très ajustées autour des grosses machines mobiles, aux formes irrégulières et aux pièces articulées. - Le champ magnétique provoqué par le courant électrique dans les câbles à proximité peut causer des interférences avec le champ magnétique du système, surtout s'il existe une boucle fermée dans le câble.

5.4 Travaux de recherche en santé et en sécurité du travail pour la détection des travailleurs à proximité des équipements mobiles

Les recherches dans le cadre de cette expertise ont pu mettre en évidence de nombreux travaux effectués par les centres de recherche en santé et en sécurité du travail et les groupes de recherche universitaires sur l'utilisation des technologies de détection de proximité afin de réduire les risques de collision entre les équipements mobiles et les travailleurs piétons.

La revue des études antérieures et la consultation des rapports de centres de recherche en santé et en sécurité du travail en ont fait ressortir un grand nombre dédié à la prévention de collision dans l'industrie minière. En raison des processus établis concernant les déplacements des personnes et des équipements mobiles dans les mines, ainsi que la continuité des opérations (Awolusi *et al.*, 2018), cette industrie pouvait constituer un point de départ plus favorable pour commencer des travaux de recherche sur l'usage des systèmes de détection de personnes.

En 2002, l'Administration de la sécurité et de la santé dans les mines aux États-Unis (MSHA) a examiné les accidents mortels liés aux machines d'extraction et a conclu que les systèmes de détection de proximité auraient pu prévenir un nombre substantiel de ces accidents dans le secteur des mines (Li *et al.*, 2012). Depuis, MSHA a étudié plusieurs technologies de détection de proximité, notamment les systèmes à ultrasons, radar, optiques et électromagnétiques. Ces travaux ont conclu que la détection de proximité électromagnétique pourrait offrir de meilleures perspectives de déploiement dans l'environnement minier (Li *et al.*, 2012; Li, Carr, *et al.*, 2019).

Il est à noter qu'en effet le premier exemplaire des technologies de détection de proximité électromagnétique a été développé à l'origine par NIOSH (Schiffbauer, 2002). En effet, cette conception est le résultat d'un projet de collaboration entre NIOSH et MSHA qui a permis de mettre en place un système actif d'avertissement de proximité appelé HASARD. Le système se base sur des marqueurs actifs d'avertissement de proximité placés sur les mineurs travaillant près d'un équipement mobile (Li *et al.*, 2012). Depuis, NIOSH n'a cessé de réviser ce système en optimisant divers paramètres technologiques et en étudiant l'influence de l'environnement de travail sur un tel système (Li *et al.*, 2012; Li, Carr, *et al.*, 2019; Li, Smith, *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2019). De plus, à travers plusieurs études, NIOSH a évalué la mise en place des champs électromagnétiques multiples et l'utilisation de triangulation pour signaler la position exacte d'un travailleur piéton (Dunn, Hargrave et Vowles, 2016).

Les différentes études de NIOSH ont conclu que les systèmes à base de marqueurs produisent moins de fausses alertes comparativement à d'autres systèmes. De plus, ils présentent l'avantage de la possibilité d'une intégration plus poussée pour d'autres fonctions comme le suivi et le contrôle des entrées et des sorties dans les zones de travail (Dunn *et al.*, 2016). Dans le cadre spécifique des mines à ciel ouvert, NIOSH a aussi conduit des études afin d'examiner la viabilité de plusieurs technologies telle que le radar, l'ultrason, l'optique et la visuelle dans la prévention de collision entre les équipements mobiles et les travailleurs. Selon les conclusions de NIOSH, la solution la plus concluante pour les véhicules de surface est la combinaison de plusieurs technologies, par exemple, un radar pour détecter le mouvement du sujet et une caméra pour confirmer la nature de l'objet (Dunn *et al.*, 2016; Ruff, T. M., 2007).

Depuis l'entrée en vigueur en 2015, des règlements sur l'obligation de l'utilisation des systèmes de détection de proximité pour les machines d'extraction continue dans l'industrie minière aux

États-Unis ([MSHA], 2015), MSHA a établi un ensemble des recommandations sur le temps actif de détection de proximité, l'intégration du système de détection et les paramètres de la zone de protection. Ces recommandations sont disponibles dans le texte de cette loi ([MSHA], 2015). Dans ce même cadre, NIOSH met à disposition des exploitants miniers, un document technique sur les considérations d'ingénierie et critères de sélection des systèmes d'alerte de proximité pour les opérations minières (The National Institute for Occupational Safety and Health [NIOSH], 2018).

Le programme de recherche de l'association australienne du charbon (ACARP) a aussi mené de son côté plusieurs projets de recherche afin de mettre au point et d'évaluer des systèmes de détection de personne pour le secteur des mines à ciel ouvert (Dunn *et al.*, 2016) :

- Le projet C7012-ACARP a permis de concevoir et d'évaluer un système de prévention de collision pour les véhicules de mines à ciel ouvert en utilisant la combinaison de marqueurs RF et les caméras vidéo de haute définition afin d'avertir le conducteur et les personnes proches d'une collision imminente.
- Le projet C8034- ACARP a exploré la détection de proximité à la surface en utilisant un radar à onde entretenue de 10,6 GHz en combinaison avec les technologies du projet C7012 pour une détection d'une portée de 30 mètres.
- Le projet C11049– ACARP a permis de concevoir un système constitué de trois modules distincts, interconnectés composés de multiples antennes radar et un microcontrôleur informatique intelligent.

ACARP a aussi entrepris des travaux afin d'explorer les problèmes associés à la quantité importante de données pour le fonctionnement de tels systèmes de détection de proximité (Dunn *et al.*, 2016). Enfin, le projet C15015-ACARP de ce programme de recherche a permis de réaliser une preuve de concept d'un système de prévention de collision avec des personnes dans les mines souterraines en implémentant des marqueurs RFID actives pour un avertissement d'une portée de 60 à 120 mètres en combinaison avec un dispositif électromagnétique pour une portée de 5 à 20 mètres (Dunn *et al.*, 2016).

L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) en France a pour sa part publié un rapport en 2015 sur la mise en œuvre des dispositifs de détection de proximité et d'aide visuelle dans la prévention des collisions entre les engins mobiles et les piétons dans les milieux de travail ([INRS], 2015). En plus de la description des dispositifs techniques, ce document analyse des étapes nécessaires au déploiement des dispositifs de détection de proximité sur les équipements mobiles. Selon ce document avant l'installation d'un système de détection, il est nécessaire de décrire les problèmes à traiter, de définir les situations à risque durant les opérations de l'équipement mobile en question et de caractériser la fonction de détection souhaitée ([INRS], 2015).

Concernant le domaine de la construction, NIOSH a publié en 2017 des diagrammes de visibilité des équipements de construction (The National Institute for Occupational Safety and Health [NIOSH], 2017). Ces diagrammes qui ont été établis à partir des informations fournies par des entreprises fabricantes des équipements de construction présentent les angles morts de visibilité de l'opérateur en fonction des opérations et des articulations de chaque équipement. Ces

diagrammes peuvent être très utiles pour les manufacturiers de systèmes de détection de proximité afin de concevoir les solutions les plus adaptées aux équipements mobiles de construction ou pour des entrepreneurs en construction qui souhaitent doter leurs engins mobiles de systèmes de détection de proximité (Han, 2019). L'administration de la sécurité et de la santé au travail (OSHA) aux États-Unis a aussi publié de la documentation établissant de meilleures stratégies afin de prévenir des incidents liés aux manœuvres de recul des engins mobiles dans le domaine de la construction. Cet organisme conseille aux compagnies de construction d'équiper leurs véhicules de caméscopes avec moniteurs intégrés et d'installer des dispositifs de détection de proximité tels que des radars ou des capteurs ultrasons afin d'aider les conducteurs à détecter les piétons qui se trouvent derrière eux (Occupational Safety and Health Administration [OSHA], 2018).

Dans le domaine des recherches universitaires et prospectives, de nombreux travaux ont été consacrés à l'évaluation des technologies proactives permettant de fournir des avertissements aux travailleurs de la construction et aux opérateurs d'équipement en temps réel (Marks, E. et Teizer, 2012). Les systèmes de détection de proximité à base de technologies radiofréquences (Fang, Cho, Zhang et Perez, 2016; Fullerton, Allread et Teizer, 2009; Lu *et al.*, 2011; Park, J., Marks, Cho et Suryanto, 2015; Teizer, Jochen, Allread, Fullerton et Hinze, 2010), d'ondes radios ULB (Cheng, T *et al.*, 2011; Hwang, 2012), de capteurs radar (Choe, Leite, Seedah et Caldas, 2013; Marks, E. D. et Teizer, 2013; Ruff, T., 2006) et de champs magnétiques (Teizer, J, 2015) ont ainsi été évalués afin de réduire les risques de collisions des engins mobiles et les piétons sur les chantiers de construction. Certaines études se sont même intéressées à la mise en place d'infrastructures de réduction du risque de collision dans le domaine de la construction comportant des systèmes de détection à base de GPS (Oloufa, Ikeda et Oda, 2003; Wang et Razavi, 2015) ou le Bluetooth (Park, J. *et al.*, 2015).

5.5 Fournisseurs de systèmes anticollisions par détection de proximité pour le milieu de travail

Les recherches réalisées dans le cadre de cette expertise ont permis d'identifier les majeurs manufacturiers de systèmes de détection de proximités pour les véhicules dans les milieux de travail confrontés au risque de collision avec les travailleurs piétons. À partir de l'analyse des données techniques de chaque produit commercialisé, les manufacturiers recensés ont été classés selon les différentes catégories de technologie de détection, tout en apportant une précision sur le principe de fonctionnement et les secteurs industriels auxquels le système est destiné (voir le tableau 8).

Les données collectées montrent que plus de 30% des systèmes recensés utilisent les technologies radiofréquences. Les systèmes utilisant une combinaison de plusieurs technologies constituent 27% des dispositifs répertoriés. Alors que 18% et 15% des systèmes identifiés utilisent respectivement des technologies électromagnétiques et d'imagerie, seulement près de 6% appliquent une technologie à ultrasons. Finalement, 3% des systèmes utilisent des radars pour effectuer la détection de proximité. Tandis qu'un seul manufacturier propose un système comportant l'association du GPS avec Bluetooth et le scrutateur par signal lumineux, aucune fiche technique des systèmes commercialisés ne cite explicitement la technologie de balayage laser.

Tableau 8. Principaux fournisseurs de systèmes anticollisions de détection de proximité classés selon la technologie utilisée et le secteur industriel

Technologie	Principe	Compagnie	Secteur
<i>Radiofréquence</i>	RFID passif	Body Guard Safety	Construction, entrepôt, atelier
		Caterpillar	Construction
	RFID actif	<i>Claitec</i>	Entrepôt, atelier (chariot élévateur)
		<i>Advanced Microwave Engineering</i>	Entrepôt, atelier (chariots élévateurs)
		Newtrax	Mines souterraines de roche dure
		Eleksen	Construction, mines, services publics, logistique, pétrole et du gaz, ferroviaire
		Zone safe	Construction, mines, déchets et recyclage, logistique, ports et terminaux, aéroports
	Interaction entre les signaux radio ultra large bande (ULB) générés par le lecteur et un marqueur placé sur le piéton	Kigistec	Construction, entrepôt, atelier, mines, ports
	Radiofréquence de large bande sur bande étroite (Wide-over-Narrowband RF)	<i>Essensium</i>	Entrepôt, atelier (chariots élévateurs)
	Radiocommunications dédiées à courte portée (DSRC)	Modular Mining Systems	Industrie minière
<i>Radar</i>	Radar à différentes portées	Preco Electronics	Construction, mines, transport, déchets et recyclage, services publics
<i>Ultrason</i>	Capteurs à ultrason	Safety Improvement Systems	Entrepôt, atelier (chariots élévateurs)

Technologie	Principe	Compagnie	Secteur
		Kigistec	Construction, entrepôt, atelier, mines, ports
<i>Imagerie et traitement d'image</i>	Vidéosurveillance avec plusieurs caméras permettant des vues panoramiques	Caterpillar	Construction
	Traitement d'image	Safety shield global	Construction, déchets et recyclage, agriculture, automobile, transport et distribution, aéroport, port maritime, entrepôt
		Hitachi Construction Machinery	Construction
	Imagerie thermique	Provox Inc	Construction, mines
	Capture d'image en 3D utilisant une lumière infrarouge modulée	Ifm Electronics	Construction, mines, aviation, agriculture
<i>Électromagnétique</i>	Interaction des ondes électromagnétiques (proches et codées) envoyées par l'émetteur installé sur le véhicule associé avec le module porté par le piéton qui détecte le champ magnétique ou qui émet aussi un champ magnétique à son tour	Strata worldwide	Construction, mines, forage de tunnel
		Proxipi	Construction, logistique
		Savex	Construction, transport, logistique, manutention
		Matrix Design Group LLC	Industrie minière
		GE Transportation	Mine souterraine
		Komatsu	Mines souterraines et à ciel ouvert
<i>Combinaison de plusieurs technologies</i>	Combinaison d'ondes radio UHF avec le radar et les ondes électromagnétiques	Becker Mining Systems	Industrie minière
	Association de capteurs radar et des caméras	Guardvant	Industrie minière

Technologie	Principe	Compagnie	Secteur
	Infrastructure basée sur la combinaison de GPS avec les ondes RF, les ondes électromagnétiques à très basse fréquence et les caméras	GE Transportation	mines à ciel ouvert
	Systèmes radiofréquences associés au GNSS (Système de positionnement par satellites)	Hexagon mining	Industrie minière
	Combinaison de radar avec plusieurs caméras de surveillance	Caterpillar	Construction, mines
	Association du traitement d'image et d'une technologie de radar à ondes millimétriques	Hitachi Construction Machinery	Construction
	Combinaison de caméras avec des radars	Preco Electronics	Construction, mines, transport, service public, déchet et recyclage
	Combinaison de GPS avec le Bluetooth et le scrutateur par signal lumineux	Blue Electronics	Construction de bâtiments, Construction civile, exploitation minière, surveillance
	Combinaison de la RFID, le GPS, l'électromagnétique et le radar bidirectionnel	PBE Group	Construction, mines

5.6 Systèmes commercialisés destinés au domaine de la construction

L'objectif principal de cette expertise étant d'identifier les technologies de détection de proximité potentiellement applicables à la prévention de collision dans le domaine de la construction nous a amenés à focaliser plus spécifiquement les recherches sur les produits commercialement disponibles dédiés à ce secteur industriel.

Comme le tableau 8 l'illustre, parfois la même compagnie propose plusieurs systèmes dont chacun utilise une catégorie de technologie spécifique. Toutefois, afin d'éviter tout risque de redondance et de confusion dans la lecture de ce rapport, la présente section énonce les solutions proposées pour le secteur de la construction par chaque manufacturier, tout en détaillant leurs composants et leurs caractéristiques techniques respectifs. Ces données sont extraites des fiches techniques ou des informations disponibles sur le site internet du manufacturier.

Il est à noter que très peu de systèmes sont spécifiquement conçus pour le domaine de la construction. La grande majorité des solutions commerciales recensées sont destinées à plusieurs secteurs industriels, dont la construction (voir le tableau 8).

Les systèmes commercialement disponibles étant destinés à d'autres secteurs industriels, tels que les mines, les travaux publics, la collecte et le tri des déchets et la manutention par chariot automoteur utilisé dans les ateliers manufacturiers et la logistique sont présentés en détail dans la partie Annexe du présent rapport.

5.6.1 Body Guard Safety

Cette compagnie dont les produits sont destinés aux domaines de la construction, d'entreposage et d'atelier manufacturier, propose deux systèmes qui reposent principalement sur la technologie RFID passive.

5.6.1.1 Système d'avertissement de proximité i-Tag

Le système est principalement conçu pour les machines utilisées dans les entrepôts, cependant il peut être mis à niveau vers des véhicules de plus grandes dimensions comme ceux utilisés en construction. Le système comprend trois composants qui interagissent les uns avec les autres :

- Un marqueur personnel (tag) porté par les piétons,
- Un capteur attaché au véhicule,
- Une unité d'alerte embarquée qui communique avec le conducteur.

Le conducteur est alerté lorsqu'un piéton portant un marqueur personnel s'approche trop près du véhicule. L'unité d'alerte avertit le conducteur d'une voix humaine pour se différencier des autres alertes de type bip qui se perd dans le vacarme d'un site industriel. Selon le manufacturier, ce système est actuellement utilisé par des compagnies comme BHP Billiton, Boral, Chevron, Rio Tinto et Cleanaway dans divers secteurs industriels (<http://www.bodyguardsafety.com.au/proximity-warning-system/>).

5.6.1.2 Système de détection piéton à double capteur - pour les gros véhicules

Le système à double capteur est destiné aux véhicules de grandes dimensions tels que les camions, les compacteurs à rouleaux vibrants, les niveleuses et les excavatrices. Le système comprend quatre composants qui interagissent les uns avec les autres :

- Un marqueur personnel porté par les piétons,
- Deux capteurs fixés à l'avant et à l'arrière du véhicule,
- Une unité d'alerte de cabine qui parle au conducteur.

Lorsque les piétons portant des marqueurs personnels s'approchent trop près de l'avant ou de l'arrière du véhicule, le conducteur du véhicule en sera informé par l'unité d'alerte de la cabine (<http://www.bodyguardsafety.com.au/dual-sensor-pedestrian-warning-system/>).

5.6.2 Eleksen

Le système proposé par cette compagnie est applicable aux domaines de la construction, des mines, des services publics, de la logistique, du pétrole et du gaz et du chemin de fer. Le système intitulé « SMART » (Self-Monitoring Analysis and Reporting Technology) est composé de deux éléments principaux dont l'un est présent sur le véhicule et l'autre sur l'ÉPI du travailleur piéton. Il permet une détection jusqu'à un périmètre de dix mètres autour du véhicule. Le système permet d'envoyer trois alertes visuelles bidirectionnelles : dans la cabine, sur le piéton et sur l'engin. Il avertit les employés localement présents sur le lieu de travail, mais il ne stocke et ne transmet aucune donnée à la salle du contrôle de la surveillance des opérations en temps réel. En se basant sur la technologie radiofréquence, le système demeure efficace dans le brouillard ou le mauvais temps. Il prend aussi en charge d'autres fonctionnalités telles que: l'avertissement de proximité d'autres véhicules, l'envoi d'alertes de détresse de la part des travailleurs en danger, la dosimétrie du bruit, l'alerte de présence de gaz, la surveillance de la posture des travailleurs, vérification de l'application correcte des ÉPIS (<https://eleksen.com/smart/>).

5.6.3 Zone Safe

La solution technologique proposée par cette compagnie vise les secteurs de la construction, des mines, de la collecte des déchets et du recyclage, de l'entreposage, des ports, et des terminaux et des aéroports. En effet, le système « PWAS » (Proximity Warning and Alert Systems) de Zone Safe est conçu pour les véhicules industriels et les engins mobiles d'usine.

En reposant sur une technologie RFID active, le système comprend une unité de contrôle positionnée dans la cabine du conducteur et une unité d'antenne installée à l'extérieur du véhicule. Alors que les piétons portent un marqueur (étiquette) d'identification. L'antenne crée une zone de détection à 360° autour du véhicule avec la possibilité de détecter des marqueurs à une distance de 3 à 9 mètres. Lorsqu'un marqueur est repéré en entrant dans la zone de détection, le système émet une alerte visuelle au conducteur à partir de l'unité de contrôle. Le piéton portant un marqueur « Vibra Tag » sera également alerté par une impulsion vibrante du marqueur. Selon la taille et la forme du véhicule, plusieurs antennes peuvent être nécessaires à l'élaboration du système. Le système enregistre tous les événements. Ces événements peuvent être visualisés et réviser à l'aide du logiciel « ZoneSafe Insight™ » afin d'optimiser les pratiques de sécurité déployées sur le lieu de travail.

Le système proposé par Zone Safe peut aussi établir d'autres dispositions de détection de proximité :

- Offrir aux piétons portant des marqueurs, un accès mains libres via des portes verrouillées ou des barrières jusqu'à 9 mètres;
- Détecter les véhicules reculant dans le sens inverse et alerter les piétons en utilisant des alarmes au niveau des allées, des passages à niveau et des angles morts des lieux de travail;
- Ralentir les véhicules en approche. Les barrières et les portes s'ouvriront ou se fermeront automatiquement lorsqu'un véhicule pénètre dans la zone de détection jusqu'à 9 mètres (<https://www.zonesafe.net/about-us/>).

Ayant effectué des cas d'études dans le domaine de la construction, cette compagnie propose des solutions sur-mesure adaptées aux chantiers de construction et à différents types d'équipements de construction (<https://www.zonesafe.net/sectors/proximitywarning-civil-engineering-construction/>).

5.6.4 Preco Electronics Inc.

La compagnie Preco Electronics propose trois différents systèmes de détection de proximité pour la prévention de la collision dans les secteurs de la construction, des mines, du transport, des services publics et de la collecte des déchets. Les solutions technologiques proposées par ce manufacturier sont essentiellement basées sur l'utilisation des radars.

5.6.4.1 Système de détection de proximité PreView® Plus

Le système est composé d'un ensemble de caméras et d'un moniteur relié aux capteurs radar permettant une surveillance active des angles morts. Il prend en charge jusqu'à 4 caméras et 24 capteurs pour une couverture du véhicule à 360°. Des indicateurs codés en couleur superposés à l'écran permettent de fournir à l'opérateur des informations sur la distance approximative des objets ou des personnes. Une alerte audible peut aussi être activée dans la cabine du véhicule (<https://preco.com/plus-monitor/>).

5.6.4.2 Système de détection de proximité PreView® Radar

Ce système étant spécialement conçu pour la surveillance des angles morts autour du véhicule est proposé avec trois configurations.

5.6.4.2.1 Système de détection PreView Sentry®

Ce système identifie simultanément et avec précision l'emplacement et la vitesse de 16 personnes ou objets entourant le véhicule. Il est capable de détecter des objets situés jusqu'à 30 mètres à l'avant du radar. Il dispose d'une zone de détection ajustable. La largeur de la zone de détection est ajustable pour s'adapter à différents types de véhicule (<https://preco.com/sentry/>).

5.6.4.2.2 Système de détection PreView Side Defender®II

Ce système a été spécifiquement développé pour assister les conducteurs des véhicules poids lourds et des équipements mobiles utilisés dans les services publics. Le radar du système émet et reçoit des signaux de faible puissance à bande étroite de 24 GHz. Le système traite ensuite les signaux renvoyés pour déterminer si un objet a renvoyé de l'énergie au capteur. Il peut aussi déterminer ainsi si l'objet identifié est en mouvement. Si l'objet est en mouvement et présente un risque potentiel de collision, il est signalé par l'écran de la cabine qui est relié au système. Il peut aussi avertir les opérateurs par des alertes sonores et visuelles. Le capteur est conçu pour traiter et signaler les détections dans un délai de 300 ms, permettant de réagir rapidement à tout objet situé dans la zone de détection (https://preco.com/side_defender/).

5.6.4.2.3 Système de détection PreView WorkSight®

Le Système qui est spécialement conçu pour les véhicules lourds nécessitant une couverture totale des angles morts se base sur la technologie de radar pulsé. Il détecte les objets dans les

conditions climatiques et de travail extrême. Il utilise deux antennes pour couvrir la largeur d'un véhicule lourd et jusqu'à 6 mètres derrière l'équipement. Il fonctionnera comme un système de capteur unique pour la couverture arrière et peut également être mis en réseau pour fournir une couverture des angles morts avant et arrière pour les véhicules encore plus gros. Avec des ajustements du système, il est aussi possible de définir une zone de détection aussi près que trois mètres (<https://preco.com/worksight/>).

La compagnie Preco Electronics a aussi réalisé des cas d'étude pour démontrer le potentiel de ses systèmes dans le domaine de la construction et confirme l'utilisation de sa technologie par des entrepreneurs du domaine de la construction aux États-Unis (<https://preco.com/oldcastle-success-in-safety/>).

5.6.5 Kigistec

La compagnie Kigistec propose deux systèmes d'anticollision par la détection de proximité dont l'un est basé sur la technologie radiofréquence et l'autre utilise la technologie à ultrasons. Les solutions technologiques de ce manufacturier sont destinées aux secteurs de la construction, de la logistique, des usines, des mines et des ports.

5.6.5.1 Système de détection de proximité IPAS

Étant basé sur une technologie de radiofréquence ULB, le système « IPAS » (Intelligent Proximity Alert System) est spécifiquement conçu afin de prévenir les accidents entre piétons et véhicules industriels. Le système comprend des balises montées sur les véhicules, les machines et les vêtements des membres de l'équipe (casques, cordons, ceintures, etc.). Grâce à la technologie de radiofréquence ULB, les capteurs peuvent communiquer entre eux et mesurer avec précision la distance qui les sépare en temps réel.

Le système IPAS est commercialisé pour les chariots élévateurs, mais il demeure adaptable à d'autres types d'équipements. Le système peut créer différentes variantes afin d'alerter les piétons et les conducteurs chaque fois qu'ils sont proches les uns des autres. Ces variantes permettent ainsi d'établir la communication de véhicule à véhicule et de véhicule à piéton. Il est aussi possible de créer des zones d'avertissement afin de sécuriser les intersections, les passages à niveau et d'autres endroits à haut risque sur un chantier ou un atelier de travail.

Le système permet aussi d'établir des zones de proximité qui permettent d'activer une alarme chaque fois qu'un véhicule ou un piéton pénètre dans une zone sélectionnée. Le système avec la configuration de base propose une plage de détection standard de véhicule à piéton allant jusqu'à dix mètres. La portée maximum pouvant être augmentée jusqu'à 30 mètres, la distance minimum détectable est de dix centimètres. Une telle distance rapprochée de détection peut être bénéfique dans les zones de travail surpeuplées.

Les capteurs autoadaptatifs employés permettent au système de s'ajuster à la fois à la vitesse du véhicule et à sa direction. Chaque IPAS est également équipé de trois avertissements programmables qui peuvent être configurés pour utiliser une alarme sonore, lumineuse ou vibrante.

5.6.5.2 Système de détection de proximité USENS

Le système « USENS » (Ultrasonic Proximity Detection System) repose sur une technologie de détection à ultrasons. Un capteur à ultrasons installé à l'avant ou à l'arrière du véhicule permet de détecter les objets ou les piétons situés dans la zone d'alerte. Un indicateur installé dans la cabine du conducteur envoie une alerte sonore dès qu'une détection est effectuée. Selon la distance détectée, différents types d'alertes peuvent être envoyés au conducteur afin de le sensibiliser à l'imminence du danger.

Dans une configuration plus avancée, le système peut aussi comprendre une caméra reliée à un écran à l'intérieur de la cabine pour offrir une meilleure visibilité au conducteur. Dans cette configuration, il est possible d'utiliser deux capteurs à ultrasons pour optimiser la détection. Le système peut être configuré et adapté à différents types de véhicule industriel (<http://kigistec.com/m22.php>).

5.6.6 Safety Shield Global

Les systèmes de prévention de collision de cette compagnie sont essentiellement basés sur les techniques d'imagerie et d'analyse d'images. Les technologies de Safety Shield Global sont destinées aux domaines suivants : la construction, la collecte de déchets et le recyclage, l'agriculture, l'automobile, le transport et la distribution, les aéroports, les ports maritimes, et la logistique.

Le système anticollision « Safety Shield » est disponible avec une configuration ayant une caméra orientée vers l'avant adaptée à tout type de véhicule ou avec une solution multicaméras intelligente conçue pour les gros véhicules utilitaires et les équipements lourds présentant des angles morts dangereux. En fonction des caractéristiques du véhicule ou de l'environnement de travail, il peut comprendre les composants suivants :

- La caméra ADAS : Elle est idéale pour les véhicules légers qui ne nécessitent pas de détection latérale. Le système envoie au conducteur une alerte sonore et visuelle lorsqu'une collision imminente à l'avant est détectée. L'alerte est envoyée jusqu'à 2,7s avant la collision. La distance dangereuse avant la collision est calculée par le système en fonction de la distance, de la vitesse et de la direction du véhicule détecté. L'utilisateur de la caméra peut enregistrer toutes les séquences ou uniquement les séquences associées à une alerte de collision ou au comportement du conducteur.
- *Les caméras intelligentes* : Afin de détecter uniquement les piétons et les cyclistes, le système filtre d'autres objets afin d'éliminer les avertissements inutiles. Il distingue la forme humaine afin de réduire le risque de collision avec une personne. Il envoie une alerte visuelle et sonore avant une collision imminente.
 - Avec les véhicules plus conventionnels, le temps avant la collision est calculé par le système et un avertissement de collision est généré lorsqu'il tombe en dessous de 2 secondes.
 - Avec les véhicules lents, tels que les équipements de construction, une application de détection virtuelle est définie autour de l'équipement. Chaque caméra peut être

ajustée séparément et différentes zones sont définies en fonction des différents environnements de chantier et des procédures de travail. Si une personne entre dans la zone, un avertissement de collision est alors généré.

- Le système peut également déclencher divers avertissements pour le conducteur et les personnes entrant dans la zone au moyen d'alarmes visuelles et sonores à l'intérieur ou à l'extérieur du véhicule.
- *L'écran d'affichage d'alarme ADAS* : est un écran multifonctions associé à la caméra ADAS qui va émettre des alertes sonores et visuelles au conducteur.
- *L'écran d'affichage PCW* : Cet écran est installé sur les montants de la cabine. L'icône de piéton s'allume en rouge lorsqu'un piéton ou un cycliste a été détecté et qu'une collision est imminente (<https://www.safetyshieldglobal.com/the-safety-shield>).

La compagnie Safety Shield Global propose des solutions spécifiques pour les équipements de construction. Elle recommande par ailleurs, une la configuration sur mesure proposée pour chaque type d'équipement. Ce manufacturier confirme que ses systèmes ont été dans le passé installés sur les équipements suivants dans les chantiers de construction :

- La pelle mécanique,
- Le mini dumper,
- Le dumper – le tombereau articulé,
- Le camion à benne basculant,
- Le rouleau compresseur,
- Les chariots télescopiques,
- La pelle de chargement (<https://www.safetyshieldglobal.com/construction>).

5.6.7 Hitachi Construction Machinery

Les solutions technologiques d'Hitachi sont spécifiquement développées pour le domaine de la construction. Elles reposent principalement sur les techniques d'analyse d'image. La technologie se base sur des systèmes qui ont été d'abord proposés pour les camions d'exploitation minière et les excavateurs hydrauliques utilisés dans les sites d'exploitation minière, d'ingénierie et de la construction.

Le système Aerial Angle® d'Hitachi intègre dans sa configuration stationnaire, la technologie de traitement d'image de caméra avec la technologie de détection d'objet en mouvement. Les images sont capturées par des caméras montées à l'avant, à l'arrière et sur les côtés du véhicule. L'opérateur est averti si des objets en mouvement sont détectés à proximité. L'avertissement est affiché sur le moniteur accompagné d'une alerte sonore. Dans une deuxième configuration, le système peut intégrer une technologie de radar à ondes millimétriques qui envoie un avertissement à l'opérateur du véhicule lorsque celui-ci s'approche d'un autre véhicule en mouvement (<https://www.hitachicm.com/global/news/all-press-releases/16-09-26-1e/>).

5.6.8 Provix Inc.

Alors que, cette compagnie propose des solutions de prévention de collision pour plusieurs secteurs industriels, ses systèmes de détection de proximité sont principalement destinés au

domaine des mines. Toutefois, les systèmes de détection de proximité de Provix sont aussi applicables au secteur de la construction.

Le système Provix combine deux caméras thermiques installées sur le véhicule et un moniteur de visualisation dans la cabine du conducteur qui permet un affichage automatique de l'image de la caméra en fonction du sens de la marche. La caméra fonctionne avec un champ de vision relativement étroit, de manière à grossir tout objet détecté. L'algorithme de détection permet d'avertir de l'imminence d'une collision avec d'autres équipements, véhicules ou travailleurs piétons en envoyant des alertes au conducteur. Il s'agit d'un système extensible qui permet d'inclure en plus des capteurs radar et des caméras latérales et arrière pour une détection de proximité optimale. Cette version peut aussi permettre l'enregistrement des événements.

Ce système qui est adapté aux environnements éblouissants, sombres et brumeux a été testé et intégré par plusieurs organismes et compagnies à travers le Canada : Installation d'Esso à Fort MacMurray (Alberta), opération d'Exxon à Kearl Lake (Alberta), exploitation minière à Syncrude Aurora (Alberta), opérations de CNRL (Canadian Natural Resources) à Jack Pine (Alberta) et Albion Hills (Ontario), opération de Suncor à Fort Hills (Alberta), les camions de transport (Colombie-Britannique) et les ambulances opérant à Terre-Neuve (<http://www.provix.net/index.asp>).

Une démonstration de la caméra thermique de Provix pour les véhicules et les équipements lourds : <https://www.youtube.com/watch?v=7pwHWqkOJUK>.

5.6.9 IFM Electronics

Le système de détection d'obstacle et de prévention de collision d'IFM utilise le capteur « O3M 3D » qui fournit une reconnaissance automatique intégrée pour permettre de détecter jusqu'à 20 objets fixes ou en mouvement sur le trajet d'un véhicule. Ce système est applicable aux équipements mobiles utilisés dans les secteurs de la construction, des mines, de l'aéroport et de l'agriculture.

Le système se base sur une technologie appelée PMD (pour Photonic Mixer Device en anglais) qui assure la détection d'objets présents dans une scène avec une seule capture d'image en 3D et sans flou de mouvement. La scène balayée est éclairée par une lumière IR invisible modulée et la lumière réfléchie par les objets présents dans la scène revient au capteur. La distance des objets avec le véhicule est par la suite calculée en mesurant le temps de vol de la lumière émise et réfléchie. En comparant la vitesse actuelle, le vecteur de mouvement et des paramètres fixes tels que la distance de freinage, la probabilité de collision est calculée par le capteur 3D et transférée au système de commande du système qui est par la suite signalée au conducteur. Dans le cadre d'une configuration spécifique, le véhicule peut même être arrêté par le système, si le conducteur ne réagissait pas malgré les alarmes.

Le système de mesure multiphase permet de détecter les interférences causées par la formation de poussière ou de brouillard d'eau et ainsi éviter les erreurs de mesures. Grâce à un algorithme développé pour le secteur automobile et à une cadence pouvant atteindre 50 images/seconde, le capteur permet un calcul rapide des données 3D. De plus, la lumière IR spécialement modulée permet un taux de reconnaissance élevé malgré la présence des matériaux réfléchissants d'intensités différentes. Le temps de réponse minimum du système est de 40 ms. Un point de

référence librement réglable sur le véhicule permet de détecter uniquement les obstacles d'une hauteur prédéfinie au-dessus du sol (<https://www.ifm.com/ca/en/shared/technologies/3d-smart-sensor-o3m/applikationen/kollisionsvorhersage>).

5.6.10 Strata Worldwide

Le système de détection de proximité et anticollision de HazardAVERT® de Strata est principalement destiné aux secteurs des mines et du forage de tunnel. Ce système est tout de même applicable aux équipements utilisés dans les opérations de construction lourdes. Il utilise une technologie de détection par champs électromagnétiques proches associés à un système d'alarme visuel et audible et comprend quatre composants principaux :

- L'écran de la cabine avec une alarme intégrée en cas de proximité imminente;
- Le générateur de la zone de proximité qui permet la création d'une zone basée sur un champ électromagnétique ajustable. Le module d'interface qui comprend à son tour l'unité de contrôle, la source d'énergie et le contrôle de l'arrêt du véhicule;
- Le module d'alarme personnelle « PAD » du système, porté par le travailleur piéton qui interagit avec le champ électromagnétique créé par le générateur afin de déterminer la proximité et émettre des alertes pour avertir le porteur.

Le système permet de ralentir et par la suite de l'arrêt de l'engin mobile si aucune action n'est prise par le conducteur en cas de détection de proximité.

Le module d'alarme personnel « PAD » est fourni sous forme d'unité à attacher à l'ÉPI ou le casque du piéton. Dans une deuxième configuration, ce module est offert sous forme d'un boîtier léger à porter dans la poche de l'ÉPI. Enfin, une troisième version de ce module étant reliée à une lampe installée sur le casque du travailleur piéton peut envoyer des alertes visuelles et sonores en cas de détection de proximité d'un véhicule équipé d'un générateur de champ électromagnétique (<https://www.strataworldwide.com/>).

5.6.11 Proxipi

Les systèmes de prévention de collision de Proxipi sont principalement destinés aux équipements mobiles utilisés pour la logistique, les travaux publics et des ateliers. Ces systèmes sont toutefois adaptables aux équipements de construction. La technologie dans ces systèmes repose sur l'émission et la maîtrise d'un champ électromagnétique codé. En effet, ce champ magnétique de faible intensité constitue une zone capable de détecter tout objet stationnaire ou mobile. La technologie proposée par Proxipi présente l'avantage d'assurer une détection à travers le métal et le béton.

Alors qu'une antenne embarquée sur l'engin émet un champ magnétique codé, un marqueur électronique porté par le piéton détecte le champ magnétique. Le marqueur émet aussi de sa part un champ magnétique. Lorsque les deux zones (les champs magnétiques émis de part et d'autre) se rencontrent, l'alerte du marqueur du piéton et l'alarme de la cabine de l'engin se déclenchent en même temps. Des alertes bidirectionnelles peuvent être sous forme sonore, visuelle ou vibratoire.

La fonction DSR (Dynamique Speed Regulator en anglais) proposée par le système permet d'exploiter dynamiquement la fonctionnalité de réduction de vitesse disponible sur un certain nombre d'équipements mobiles. Pour exploiter cette fonction dans l'environnement de travail, un balisage des zones à risque est réalisé à l'aide des balises fixes. L'engin évolue dans une zone dégagée sans danger identifié, il roule alors à une vitesse optimisée. Dès que l'engin entre dans une zone à risque, la fonction DSR réduit automatiquement sa vitesse. Lorsque l'engin sort de la zone à risque, la fonction DSR réaffecte automatiquement la vitesse optimisée (<https://www.proxipi.com/technologie/>).

5.6.12 Savex

Le système de Savex étant basé sur technologie électromagnétique, offre des capacités de détection de proximité de personne aux équipements utilisés dans la construction, le transport, la logistique et la manutention.

Ce système permet d'informer le conducteur de la présence d'une ou plusieurs personnes (jusqu'à 50 piétons simultanément) dans une zone de détection autour de l'engin allant jusqu'à 25 mètres. La zone de détection peut être ajustée de quelques mètres allant même jusqu'à 30 mètres si nécessaire. De plus, deux zones de détections, « zone de préalerte » et « zone d'alarme » peuvent être paramétrées sur le système. Le système comprend quatre composants principaux :

- Le boîtier portatif du piéton qui transmet en permanence un signal à un récepteur permettant de calculer la distance avec l'engin;
- Le récepteur installé sur l'engin qui reçoit le signal et le transmet à l'unité centrale pour analyse;
- L'unité centrale embarquée traite les signaux envoyés par le récepteur;
- L'afficheur de la cabine qui communique le nombre de piétons détectés. Ce composant du système permet aussi de déclencher des alarmes sonores et visuelles dès la détection d'une personne (<http://www.savex-securite.fr/le-systeme-save-x/fonctionnement.php>).

La technologie utilisée pour l'élaboration de ce système est issue des recherches réalisées à l'INPI (Institut National de la Propriété Industrielle) en France. Le dispositif conçu par Savex s'appuyant sur deux principes technologiques de champ magnétique :

- Le champ magnétique proche de basse fréquence qui permet de s'affranchir des obstacles métalliques ou autres;
- Le champ tournant multidirectionnel qui offre une détection optimale, quelle que soit la posture du piéton (debout, assis, couché).

Cette aptitude du système à pouvoir générer différents types de champs magnétiques lui permet d'être opérationnel dans les conditions d'environnement difficiles. L'algorithme de traitement de signal de détection utilisé dans ce système lui confère une capacité d'exploitation très rapide des

données collectées (<http://www.savex-securite.fr/innovation-technologique/innovations-technologiques-et-brevets.php>).

Il est à noter que le système de détection de proximité de personne de Savex a été testé dans les environnements de travail des chantiers de construction et il peut être configuré et adapté à différents types de chantiers de construction (<http://www.savex-securite.fr/domaines-d-applications/industries.php>).

5.6.13 Caterpillar

La compagnie Caterpillar propose des systèmes de détection de proximité et d'anticollision, de manière spécifique pour différents secteurs industriels. En ce qui concerne le secteur de la construction, cette compagnie offre aux entreprises œuvrant dans ce secteur le choix d'un ou plusieurs systèmes de détection de proximité selon leur besoin.

Les dispositifs proposés par cette compagnie se basent soit sur des systèmes de caméras de vidéosurveillance qui contribue à éliminer les angles morts et à améliorer la visibilité des opérateurs autour des équipements, soit des systèmes d'identification par radiofréquence pour un meilleur repérage du personnel piéton. Une troisième option consiste en l'association de détecteurs de proximité par radar et de caméras embarquées pour indiquer aux opérateurs, où et à quelle distance se trouvent les objets ou les personnes.

5.6.13.1 Le système de détection Cat® Detect with vision for construction

Les systèmes de caméras de vidéosurveillance conçus par Caterpillar permettent d'améliorer la visibilité des opérateurs lors du démarrage et des manœuvres du véhicule équipé par le système.

Le système utilise la technologie de vision sur la zone de travail WAVS (Work Area Vision System en anglais) qui est adaptable à divers types d'équipement de construction Cat® ou pas. La technologie WAVS propose de multiples configurations allant d'un système à une caméra à un système à quatre caméras. Cependant, l'installation des options de la technologie WAVS à une, deux, trois ou quatre caméras requiert différents dispositifs d'alimentation de 12 ou 24 volts en courant continu. Muni de caméras en circuit fermé intégrées à l'équipement mobile, le système engage automatiquement chaque caméra en fonction du mouvement de la machine pour envoyer la vue appropriée au moniteur (exemple, la vue arrière pour la marche en arrière). Cependant, le système permet à l'opérateur de concentrer l'objectif de la caméra sur des zones spécifiques afin d'améliorer l'efficacité de la détection.

La caractéristique principale de cette technologie de vidéosurveillance est sa conception de type « globe oculaire » qui facilite le réglage de la position de l'objectif et la rend polyvalente, sans limitation de support vertical ou horizontal. Ces caméras qui résistent aux vibrations d'une amplitude de 15 G, offrent des vues panoramiques à 115° et à 78° étroites pour que les opérateurs puissent avoir beaucoup plus de zones de travail avec plus de détails.

Il est à noter que les configurations de ce système sont sélectionnées en fonction de la taille de l'équipement mobile, de l'environnement du chantier et de la nature de l'opération (https://www.cat.com/en_US/products/new/technology/detect/detect/1000030212.html).

5.6.13.2 Le système de détection Cat® Detect for personnel

Ce système utilise la technologie RFID passive qui est placée dans des gilets de sécurité, des casques de sécurité des travailleurs piétons sous forme des marqueurs (étiquettes) fixes. Une antenne radio UHF est installée sur les équipements mobiles pour communiquer avec les marqueurs RFID, alors qu'une alarme dans la cabine et un haut-parleur externe permettent de lancer des avertissements. L'alarme est déclenchée si une personne ou un objet porteur de marqueur se trouvent dans la zone de couverture par les signaux RF. En effet, mis à part l'ÉPI d'un piéton, n'importe quel objet (générateurs, lampadaires, camionnettes, etc.) sur le chantier peut être équipé par un marqueur RFID.

Le signal radio UHF de l'antenne s'étend de 7 à 9 mètres d'un côté à l'autre et de 3 à 4 mètres de haut en bas de l'équipement mobile. Ce signal qui est détectable à travers la poussière et le brouillard ne traverse pas les objets métalliques. Le système peut être activé à l'allumage ou uniquement lorsque l'équipement fonctionne en marche arrière

(https://www.cat.com/en_US/products/new/technology/detect/detect/1000030201.html).

5.6.13.3 Le système de détection Cat® Integrated Object Detection System™

Ce système a été dans un premier temps conçu pour le secteur des mines, toutefois il est aussi applicable aux équipements mobiles utilisés dans la construction. Le système applique une combinaison de technologies de vidéosurveillance et des capteurs radar. Il permet d'équiper autant les petits équipements auxiliaires que les camions lourds selon des configurations de 1 à 4 caméras et de 8 radars.

Ce système fonctionne au démarrage de la machine et lorsqu'elle se déplace à basse vitesse. Il utilise un radar pour détecter le matériel, les véhicules et autres dangers dans les zones critiques autour de la machine : avant, arrière et sur le côté.

À l'aide des caméras embarquées, le système offre aux opérateurs une vue des zones spécifiques où des dangers sont détectés, tandis que la barre de proximité sur l'écran de la cabine clignote en jaune ou en rouge en fonction de la distance de l'objet détecté (<https://www.youtube.com/watch?v=pRtnWC-vshq>).

5.6.14 Blue Electronics

Le système de détection de proximité et d'anticollision de Blue Electronics est destiné aux secteurs suivants : la construction de bâtiments, la construction civile, l'exploitation minière et la surveillance. L'unité de détection de ce système peut être installée sur des machines lourdes et légères, notamment des excavatrices, des bulldozers, des chargeuses compactes, des niveleuses et des véhicules de supervision, tandis que les travailleurs piétons portent un dispositif de proximité personnelle sur leurs vêtements.

En effet, le système utilise des technologies de renforcement GPS et satellitaires pour suivre à un mètre près la position de tous les objets reliés au système sur le site, le Bluetooth étant appliqué comme mesure de sécurité en cas de défaut de fonctionnement du GPS. Il applique aussi un scrutateur par signal lumineux pour détecter la distance avec les personnes ou les objets présents sur la trajectoire du véhicule. Un mur virtuel peut également être implémenté pour fournir une protection supplémentaire à la zone de travail. Ceci est fait en désignant une zone où une

machine peut fonctionner et en délimitant les contours de la zone de travail. Ce mur virtuel situé sur le périmètre de la zone de travail, alerte les opérateurs lorsqu'ils quittent une zone sécurisée.

Trois dispositifs constituent les composants principaux de ce système :

- *Le dispositif de détection de proximité personnelle* : Le dispositif PPDS (pour Personal Proximity Detection Systems, en anglais) surveille les travailleurs et leur position par rapport au véhicule hôte.
 - Le dispositif utilise un appareil de mesure du temps de vol (étant une technique de calcul de la distance entre la caméra et le sujet pour chaque point de l'image en mesurant le temps d'aller-retour d'un signal lumineux artificiel (fourni par un laser ou une DEL) pour repérer les piétons et leurs distances avec le véhicule.
 - Si un travailleur franchit une des zones configurables autour du véhicule, une alarme est donnée à l'opérateur.
 - Les paramètres de chaque véhicule peuvent être configurés afin de s'adapter à différentes tailles de véhicules. Le système dispose également d'une fonction «Buddy Alert™» permettant à tous les travailleurs reliés au système de déclencher une alarme générale sur le chantier.
- *Le panneau de configuration des opérateurs* : Le panneau de commande installée dans la cabine fournit à l'opérateur une vue d'ensemble des véhicules et des travailleurs environnants le véhiculent.
 - Si un objet ou une personne entre dans la zone configurable d'alerte, une alarme est déclenchée et la zone violée est affichée sur le panneau.
 - L'opérateur est alerté de la distance entre le véhicule et l'objet au moyen d'une zone codée de couleur clignotante représentant la distance.
 - Dans le cas où une alerte de contact est déclenchée par un travailleur piéton, l'opérateur est alerté par un avertissement séparé afin qu'il puisse prendre les mesures nécessaires.
- *Le dispositif de détection de piétons* : Il comprend un boîtier électronique qui est porté par toute personne travaillant à proximité de l'équipement mobile.
 - Si le travailleur entre dans la zone d'alerte du véhicule, il sera alerté par une série d'alertes sonores, de clignotements et de vibrations émises par le boîtier.
 - L'appareil dispose également d'un GPS interne qui fournit à l'opérateur du véhicule des informations sur le positionnement des piétons.

Le système de détection de proximité de Blue Electronics permet l'enregistrement des événements et des alarmes déclenchées à des fins d'optimisation des pratiques de sécurités sur le chantier (http://www.blueelectronics.com.au/product_detail/165/PPD/).

5.6.15 PBE Group

Le système de détection de proximité et de prévention de collision PAS (pour Proximity Alert System, en anglais) de la compagnie PBE est adaptable à divers types de véhicules, y compris les équipements mobiles lourds et légers. Pour cela, les unités du système doivent être configurées pour convenir à différents types de véhicules.

S'agissant d'un système de détection basé sur les marqueurs RFID pour les équipements mobiles et fixes, y compris le personnel, l'appareil avertit les conducteurs de la présence de piétons, d'autres véhicules, d'obstacles et de clôtures virtuelles définies par l'utilisateur. En effet, le récepteur GPS intégré du système permet le suivi du terrain et la définition de géociblage et de clôture virtuels autour des équipements ou des zones de travail.

Le système peut être programmé de manière à reconnaître quatre groupes prédéfinis par l'utilisateur, tels que le personnel, les équipements, les types de véhicules, les visiteurs, les obstacles, etc. Chaque dispositif embarqué sur un véhicule dispose alors de quatre zones configurables pour chaque type de groupe. La polyvalence des configurations du système permet aussi de sélectionner parmi plusieurs scénarios d'avertissement et élimine ainsi les risques de fausses alarmes. Ainsi, la détection d'un objet n'est pas confondue avec la détection d'une personne.

Le système est capable de fournir des informations sur la direction et la distance des personnes ou des obstacles en utilisant plusieurs technologies, notamment la RFID, le GPS, l'électromagnétique et le radar bidirectionnel. Plusieurs technologies peuvent être utilisées simultanément pour permettre une détection précise et une génération de rapports d'événements par le système. En effet, le logiciel de support du système permet de générer des rapports et de contrôler avec précision les sites de travail (<https://pbegrp.com/safety/proximity-alerts/>).

6. DISCUSSION

6.1 Disponibilité des systèmes de détection de proximité

Selon le résultat des recherches effectuées dans le cadre de cette expertise, l'industrie des mines semble être le secteur qui s'est vu offrir le plus grand nombre de solutions de détection de proximité et d'anticollision. Alors que seulement deux manufacturiers dédient leurs dispositifs uniquement au secteur de la construction, pas moins de huit compagnies consacrent leurs systèmes de détection de proximité seulement au secteur des mines (voir le tableau 8). Même parmi les manufacturiers qui visent plusieurs secteurs industriels, de nombreuses solutions technologiques ont été dans un premier temps développées pour l'industrie minière.

En effet, la mise en vigueur des nouvelles réglementations dans le secteur des mines dans quelques pays (Department of Mineral Resources, 2015; Mine Safety and Health Administration, 2015) semble avoir grandement favorisé la mise en marché des systèmes de détection de proximités qui sont spécifiquement destinés à ce secteur industriel. Dans un tel contexte, un certain nombre de produits consacrés à la prévention des collisions entre les équipements mobiles et les travailleurs piétons dans le secteur minier s'avère même avoir obtenu des approbations et des numéros de certificat de la part des organismes tels que MSHA ([MSHA], 2018).

Les processus établis concernant le mouvement des personnes et des équipements dans les mines par zonage et autres méthodes (Awolusi *et al.*, 2018) ont sans doute fourni un terrain favorable aux travaux de recherche et développement sur les systèmes de détection et d'anticollision en comparaison avec un secteur comme la construction où les équipements sont déplacés quotidiennement et où de nombreux intervenants et travailleurs entrent et sortent des chantiers. De plus, la volonté des exploitants miniers à initialement implémenter des systèmes de prévention de collision entre les équipements mobiles généralement très dispendieux a par la suite offert un contexte très favorable à leur déploiement dans un contexte de détection de personne (Lee *et al.*, 2017).

Bien que l'utilisation des systèmes de détection de proximité à des fins de réduction de risque d'accident de collisions entre les équipements mobiles et les piétons soit bien ancrée dans le secteur des mines dans des pays comme les États-Unis, cependant les centres de recherche en santé et en sécurité du travail de ces régions continuent leurs investigations sur les limites et les portées de telles technologies (Lee *et al.*, 2017; Li, Carr, *et al.*, 2019; Li, Smith, *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2019).

De nombreuses solutions technologiques pour la détection de proximité sont aussi disponibles pour les chariots élévateurs qui sont principalement utilisés dans les domaines de l'entreposage et des ateliers manufacturiers (voir le tableau 8 et la partie annexes). Selon leurs fournisseurs, ces dispositifs seraient adaptables aux plus petits équipements mobiles utilisés dans le secteur de la construction ou celui des mines. Cependant, cette démarche d'adaptation requerrait des travaux de configuration et d'ajustement des paramètres du système dans un nouveau secteur industriel.

Une des attentes de la CNESST dans la formulation de la demande de cette expertise était d'obtenir le prix des technologies de détection de proximité. Toutefois, il fut très difficile d'obtenir un tel renseignement auprès des manufacturiers, car les prix sont fournis en échange d'informations précises sur l'engin mobile à équiper et selon la conformation de son environnement de travail. En effet, la configuration d'un système et même le processus de sa mise en place peuvent varier d'un équipement mobile à un autre en raison des différences de mouvements et d'articulation de ses différentes parties. Par exemple, selon la taille et la forme du véhicule, plusieurs antennes ou capteurs selon la technologie utilisée peuvent être nécessaires à la configuration du système. De plus, la configuration des paramètres élémentaires de chaque système qui engendre aussi des coûts dépend du type d'équipement. En effet, un ajustement de base de ces paramètres est nécessaire pour que le système puisse convenir aux caractéristiques du véhicule. Dans certains cas, les manufacturiers proposent même une phase de travaux préliminaires sur l'engin mobile en question afin de s'assurer du bon fonctionnement du système sur un tel équipement. D'autres offrent même une étude de la faisabilité du système sur l'équipement désiré dans l'environnement de travail final.

Même dans un contexte moins complexe comme l'usage des chariots élévateurs, le modèle exact de l'engin et le nombre d'équipements est nécessaire pour obtenir une soumission. Selon la technologie employée, la superficie du milieu de travail à couvrir (nécessaire à l'installation des balises) et le nombre de travailleurs à surveiller sont aussi exigés dans les échanges avec les manufacturiers. Cependant, il est à noter que dans les secteurs non réglementés par l'utilisation des systèmes de détection de proximité, une liberté de choix est offerte à l'utilisateur afin qu'il puisse sélectionner selon sa volonté et son budget, un ou plusieurs systèmes et le nombre d'unités du système (par exemple le nombre de capteurs à installer).

6.2 Portée technologique des systèmes de détection de proximité

Tout au long de ce rapport, l'auteur a préféré d'employer le terme « système de détection de proximité » afin de désigner les dispositifs recensés. En effet, un certain nombre de technologies, bien que performantes dans la prévention des risques de collision, ne permettent pas de distinguer un obstacle d'une personne. Seulement les technologies de détection à base de radiofréquence et de champs électromagnétiques, qui déterminent l'emplacement du personnel piéton à l'aide de marqueurs portés par celui-ci, et les technologies basées sur le traitement d'image permettent de distinguer clairement des personnes d'autres objets présents sur le trajet du véhicule.

De plus, les technologies qui utilisent le port des marqueurs comme moyen d'identification de personne permettent une meilleure visibilité et traçabilité des informations en temps réel. Les marqueurs peuvent être lus dans diverses conditions environnementales difficiles, tels que la neige, la pluie, le verglas, le brouillard, la poussière, la saleté, à l'intérieur des conteneurs et des véhicules (Alarifi *et al.*, 2016; Awolusi *et al.*, 2018; Cheng, T *et al.*, 2011; Fang *et al.*, 2016). Les technologies basées sur les ondes radiofréquence ULB présentent l'avantage de posséder une portée plus longue, une vitesse de mesure plus élevée, une précision de mesure améliorée et une immunité encore plus grande face aux interférences environnementales par rapport à d'autres technologies (Alarifi *et al.*, 2016). D'autre part, les technologies de détection à base de champs électromagnétiques présentent la singularité de la création de zones de détection de proximité avec des géométries variables pour une meilleure adaptation aux opérations des équipements mobiles.

Malgré le grand potentiel des technologies de détection de proximité, chacune présente un certain nombre de limites. En effet, les données des tableaux 2 à 7 de ce rapport qui récapitulent les caractéristiques des différentes technologies de détection de proximité permettent de mettre en évidence les avantages et les limites de chacune. Par exemple malgré le grand potentiel des technologies radiofréquences et électromagnétique dans l'identification précise des personnes, leur sensibilité aux pièces métalliques est une importante source de mauvaises ou de fausses détections dans certains environnements de travail. Dans d'autres cas, certaines technologies semblent moins convenir à quelques milieux de travail. À titre d'exemple, les technologies d'analyse d'image ou de balayage laser peuvent présenter de sérieuses limites dans un secteur tel que la construction où la présence de la poussière, la buée, la pluie, la neige ou la fumée peut perturber la détection et mener à de fausses identifications.

Les recherches réalisées dans le cadre de cette expertise ont permis de remarquer, tant dans les travaux de recherche que dans les développements industriels, une grande tendance technologique qui favorise de plus en plus les plates-formes multicapteurs intégrant plusieurs éléments de détection. Le principe qui sous-tend cette idée est de sélectionner des technologies de détection de proximité complémentaires afin de pouvoir recouvrir plus de situations et reconnaître un plus large éventail d'objets fixes et mobiles ou des personnes avec différentes postures. En effet, au vu des connaissances actuelles sur les systèmes de détection de proximité, la mise en place des systèmes composés de plusieurs technologies pourrait permettre de créer un effet synergique et de contourner les limites des techniques existantes. Par ailleurs, l'utilisation simultanée de plusieurs technologies peut soutenir une détection plus précise des obstacles créant un risque de collision. Les configurations polyvalentes de ces types de systèmes peuvent aussi permettre plusieurs scénarios d'avertissement pour ainsi éliminer les risques de mesures erronées et de fausses alarmes.

La combinaison de plusieurs technologies peut même être plus efficace dans le cas des systèmes qui reposent sur une catégorie de technologie donnée. L'exemple le plus concret est le système élaboré par le groupe Savex (voir la section 5.6.12) qui se base sur la création de deux types de champ autour du véhicule : le champ magnétique proche de basse fréquence pour s'affranchir des obstacles métalliques et le champ tournant multidirectionnel pour une détection optimale de la personne indépendamment de sa posture.

Finalement, comme les manufacturiers tout comme de nombreux groupes de recherche (Awolusi *et al.*, 2018; Barata et da Cunha, 2019; Cho *et al.*, 2017; Choe *et al.*, 2014; Dunn *et al.*, 2016; Esfahan *et al.*, 2017; Han, 2019; Marks, E. et Teizer, 2012; Marks, E. D. et Teizer, 2013; Park, J. *et al.*, 2015; Park, M.-W. et Brilakis, 2012; Seo *et al.*, 2015) le précisent, les systèmes de détection de proximité ne remplacent en aucun cas les bonnes pratiques de sécurité et la vigilance des opérateurs. Ces dispositifs doivent être considérés comme une assistance aux conducteurs et une mesure supplémentaire de protection contre les accidents dus aux collisions. Il est en effet recommandé d'utiliser ces dispositifs dans le cadre des stratégies de sécurité dans les milieux de travail tout en demandant aux opérateurs de se comporter de manière conforme aux protocoles de la santé et de la sécurité au travail.

7. CONCLUSION

En raison de la présence de divers types d'équipements mobiles sur les chantiers de construction qui se déplacent souvent, des parties articulées des machines qui fonctionnent différemment d'une opération à l'autre et des espaces confinés des travaux de construction qui exigent souvent que les travailleurs soient à proximité des machines, le nombre d'accidents liés à la collision des travailleurs avec des engins mobiles demeure encore important dans ce secteur, et ce malgré l'adoption des programmes de sécurité et les moyens d'avertissement de type alarmes sonores. Dans un tel contexte, les systèmes de détection de proximité et d'alerte en temps réel permettant de prévenir les opérateurs des équipements mobiles ainsi que les travailleurs piétons des situations de proximité dangereuse peuvent apporter une couche supplémentaire de sécurité aux travailleurs qui œuvrent trop près des engins mobiles. À la demande de la CNESST, la présente expertise a donc été réalisée afin de dresser l'état de l'art portant sur les technologies de détection de personnes applicables aux chantiers de construction.

Afin de mener à bien les objectifs de cette expertise, les principales technologies de détection de personnes à proximité des engins mobiles ont été identifiées et leurs caractéristiques techniques, leurs avantages et leurs limites ont été analysés. En plus d'explorer les travaux de recherche réalisée dans ce domaine, les produits commercialisés destinés à la détection de proximité conçus pour les équipements mobiles dans le secteur de la construction et d'autres secteurs ayant des problématiques similaires de détection ont été inventoriés. Parmi les systèmes disponibles dans le commerce, les dispositifs élaborés pour le secteur de la construction ont été présentés en détail.

Enfin, l'état actuel des connaissances sur l'utilisation de ces types de systèmes dans le domaine de la construction a été discuté. En effet, les résultats des recherches ont pu mettre en évidence la mise en vigueur des réglementations sur l'obligation de l'utilisation des systèmes de détection de personnes sur les équipements mobiles utilisés dans certaines opérations d'exploitations minières aux États-Unis et en Afrique du Sud. L'établissement de telles normes et la volonté et les processus connus concernant le mouvement des personnes et des équipements dans les mines semblent avoir favorisé la mise en marché de systèmes de détection de proximités qui sont spécifiquement conçus pour le secteur des mines. Alors que très peu de solutions commerciales sont destinées de manière spécifique au domaine de la construction, de nombreux systèmes visent plusieurs secteurs en même temps.

Il a pu être constaté que dans l'état actuel des technologies, aucun système ne peut répondre d'une manière universelle à toutes les situations de danger et à tous types d'équipements. De plus, la configuration d'un même système et les démarches de sa mise en place peuvent varier d'un équipement mobile à un autre en raison des différences de mouvements et d'articulation de ses différentes pièces. Parmi les technologies de détection de proximité qui sont employées dans la prévention des risques de collision, certaines ne permettent pas de distinguer clairement un obstacle de type objet d'une personne. En effet, seulement les technologies de la radiofréquence et des champs électromagnétiques, qui évaluent l'emplacement de marqueurs portés par le personnel piéton, et les technologies basées sur le traitement d'image peuvent permettre de distinguer clairement des personnes d'autres objets présents sur le trajet du véhicule. De plus, les systèmes basés sur les ondes radiofréquence ULB, permettent de repérer la position exacte de la personne tout en procurant une portée plus longue de la zone de détection avec plus de

précision et moins de sensibilité face aux interférences environnementales. D'autre part, les systèmes basés sur les champs électromagnétiques facilitent la création de zones de détection de proximité de géométries variables pour une meilleure couverture sécurisée des espaces autour des équipements d'une manière spécifique à chaque engin et chaque opération.

Les recherches dans le cadre de cette expertise ont par ailleurs pu démontrer que même les systèmes les plus performants présentent un certain nombre de limites. À titre d'exemple, les technologies de radiofréquence et de champs électromagnétiques demeurent sensibles aux pièces métalliques présentes dans l'environnement de travail, ce qui peut induire des détections erronées. Afin de contourner les limites de différentes technologies, des systèmes composés de plusieurs technologies pourraient constituer une solution tangible tout en créant un effet synergique. Il est aussi nécessaire de préciser que les dispositifs de détection de proximité sont à considérer comme une couche supplémentaire des mesures de sécurité des travailleurs et ne remplacent aucunement les bonnes pratiques et la vigilance des opérateurs des engins mobiles et du reste du personnel. Les technologies de détection de proximité présentent certes, un grand potentiel dans la prévention des risques de collisions entre les équipements mobiles et les travailleurs piétons, toujours est-il que plusieurs points méritent plus de réflexion :

- Une technologie de détection donnée peut-elle répondre à toutes les exigences d'un milieu de travail dynamique et transitoire comme celui de la construction ?
- Si la combinaison de plusieurs technologies était la meilleure solution pour une détection optimale, quelles technologies devraient être sélectionnées en fonction de la nature des travaux ?
- Au vu de la variété et du nombre important d'équipements mobiles déployés sur les chantiers de construction, quelle est la technologie ou la combinaison technologique pour chaque type d'équipement ?
- Quelles sont les démarches nécessaires pour adapter au secteur de la construction des systèmes élaborés dans un premier temps pour un autre secteur industriel ?
- Quelle est l'approche à mettre en œuvre pour mieux supporter les entrepreneurs dans leur démarche quant au choix des systèmes de détection de proximité en fonction de leurs équipements et leurs opérations respectives ?
- À quel point la présence d'un ou plusieurs écrans d'affichage de détection impacte-t-elle la charge mentale, la vigilance et le temps de réaction des opérateurs ?
- Dans quelles conditions, les mises à l'arrêt de l'équipement mobile par le système de détection de proximité sont-elles nécessaires ? Quel est l'impact d'un tel processus sur la sécurité de l'engin, de l'opérateur et des travailleurs à proximité ?

L'ensemble de ces questions et tant d'autres encore à poser, mettent en évidence la nécessité de la réalisation des travaux de recherche afin de mieux élucider des stratégies de sécurité et les infrastructures optimales à mettre en place afin d'éviter la collision entre des personnes et des engins mobiles dans le secteur de la construction comme dans d'autres milieux de travail.

BIBLIOGRAPHIE

- Alarifi, A., Al-Salman, A., Alsaleh, M., Alnafessah, A., Al-Hadhrami, S., Al-Ammar, M. et Al-Khalifa, H. (2016). Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances. *Sensors*, 16(5), 707.
- Antwi-Afari, M. F., Li, H., Wong, J. K.-W., Oladinrin, O. T., Ge, J. X., Seo, J. et Wong, A. Y. L. (2019). Sensing and warning-based technology applications to improve occupational health and safety in the construction industry: A literature review. *Engineering, Construction and Architectural Management*.
- Awolusi, I., Marks, E. et Hallowell, M. (2018). Wearable technology for personalized construction safety monitoring and trending: Review of applicable devices. *Automation in Construction*, 85, 96-106.
- Barata, J. et da Cunha, P. R. (2019). *Safety is the new black: The increasing role of wearables in occupational health and safety in construction*. Communication présentée à International Conference on Business Information Systems, Séville, Espagne.
- Bhagyashree, S., Singh, T. S., Kiran, J. et Padmini, L. S. (2019). Vehicle speed warning system and wildlife detection systems to avoid wildlife-vehicle collisions. Dans V. Sridhar, M. C. Padma, K. A. Radhakrishna Rao (Édit.). *Emerging research in electronics, computer science and technology: Proceedings of International Conference, ICERECT 2018* (p. 961-968). Singapour, Singapour: Springer.
- Chae, S. et Yoshida, T. (2010). Application of RFID technology to prevention of collision accident with heavy equipment. *Automation in Construction*, 19(3), 368-374.
- Cheng, T., Migliaccio, G. C., Teizer, J. et Gatti, U. C. (2012). Data fusion of real-time location sensing and physiological status monitoring for ergonomics analysis of construction workers. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(3), 320-335.
- Cheng, T., Venugopal, M., Teizer, J. et Vela, P. (2011). Performance evaluation of ultra wideband technology for construction resource location tracking in harsh environments. *Automation in Construction*, 20(8), 1173-1184.
- Cho, Y. K., Yang, X. et Park, J. (2017). Improving work zone safety utilizing a new mobile proximity sensing technology. Tiré de https://www.cpw.com/sites/default/files/publications/SS-2017-Bluetooth-Technology-Struck-by_1.pdf
- Choe, S., Leite, F., Seedah, D. et Caldas, C. (2013). Application of sensing technology in the prevention of backing accidents in construction work zones. Dans I. Brilakis, S. Lee, B. Becerik-Gerber (Édit.), *Computing in civil engineering: Proceedings of ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering* (p. 557-564). Los Angeles, CA: ASCE.
- Choe, S., Leite, F., Seedah, D. et Caldas, C. (2014). Evaluation of sensing technology for the prevention of backover accidents in construction work zones. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 19(1), 1-19.
- Demirkesen, S. et Arditi, D. (2015). Construction safety personnel's perceptions of safety training practices. *International Journal of Project Management*, 33(5), 1160-1169.
- Department of Mineral Resources. (2015). *Mine health and safety act: Regulations relating to machinery and equipment*. Tiré de https://www.greengazette.co.za/notices/mine-health-and-safety-act-29-1996-regulations-relating-to-machinery-and-equipment_20150227-GGR-38493-00125.pdf

- Dunn, M., Hargrave, C. et Vowles, M. (2016). *Proximity detection device interoperability: ACARP C24034*. Tiré de https://emesrt.org/wp-content/uploads/2016/06/C24034-Final-Report_Secured.pdf
- Esfahan, N. R., Du, S., Anumba, C. et Razavi, S. (2017). Smart tracking of highway construction projects. Communication présentée à ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering (p. 187-195). Seattle, WA: ASCE. doi: [10.1061/9780784480830.024](https://doi.org/10.1061/9780784480830.024)
- Fang, Y., Cho, Y. K., Zhang, S. et Perez, E. (2016). Case study of BIM and cloud-enabled real-time RFID indoor localization for construction management applications. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(7). Tiré de [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001125](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001125)
- Fullerton, C. E., Allread, B. S. et Teizer, J. (2009). *Pro-active-real-time personnel warning system*. Communication présentée à Construction Research Congress 2009: Building a sustainable future (p. 31-40). Seattle, WA: ASCE.
- Gan, L. et Zhang, H. (2018). *Research on laser proximity detection method based on optical circumferential scanning technology*. Communication présentée à Optical Sensing and Imaging Technologies and Applications (vol. 10846, p. 1084607). Beijing, Chine. doi: [10.1117/12.2502666](https://doi.org/10.1117/12.2502666)
- Gheisari, M. et Esmaeili, B. (2019). Applications and requirements of unmanned aerial systems (UASs) for construction safety. *Safety Science*, 118, 230-240.
- Hallowell, M. R. (2011). Safety-knowledge management in American construction organizations. *Journal of Management in Engineering*, 28(2), 203-211.
- Han, W. (2019). *A connected work zone hazard detection system for highway construction work zones*. Tiré de https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/90896/Han_W_T_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Hinze, J. W. et Teizer, J. (2011). Visibility-related fatalities related to construction equipment. *Safety science*, 49(5), 709-718.
- Hwang, S. (2012). Ultra-wide band technology experiments for real-time prevention of tower crane collisions. *Automation in Construction*, 22, 545-553.
- Institut National de Recherche et de Sécurité. (2015). *Prévenir les collisions engins-piétons : la place des dispositifs de détection de d'aide visuelle* (Rapport n° ED 6083). Tiré de <http://www.inrs.fr/dms/inrs/CataloguePapier/ED/TI-ED-6083/ed6083.pdf>
- Kanan, R., Elhassan, O. et Bensalem, R. (2018). An IoT-based autonomous system for workers' safety in construction sites with real-time alarming, monitoring, and positioning strategies. *Automation in Construction*, 88, 73-86.
- Lee, C., Suh, J., Baek, J. et Choi, Y. (2017). Review of collision avoidance systems for mine safety management: development status and applications. *Tunnel and Underground Space*, 27(5), 282-294.
- Li, J., Carr, J. et Jobes, C. (2012). A shell-based magnetic field model for magnetic proximity detection systems. *Safety Science*, 50(3), 463-471.
- Li, J., Carr, J., Zhou, C., Jobes, C. C., Swanson, L. R. et Bellanca, J. (2019). The influence of a continuous mining machine and roof/rib mesh on magnetic proximity detection systems. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 1-6.
- Li, J., Smith, A., Carr, J. et Whisner, B. (2019). Influence of temperature on generator current and magnetic field of a proximity detection system. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 36(3), 541-545.
- Lu, W., Huang, G. Q. et Li, H. (2011). Scenarios for applying RFID technology in construction project management. *Automation in Construction*, 20(2), 101-106.

- Marks, E. et Teizer, J. (2012). *Proximity sensing and warning technology for heavy construction equipment operation*. Communication présentée à Construction Research Congress 2012: Construction challenges in a flat world (p. 981-990). West Lafayette, IN. Tiré de <https://pdfs.semanticscholar.org/ebbd/334060189cfe47833ee9a468b9d4e7da2cb5.pdf>
- Marks, E. D. et Teizer, J. (2013). Method for testing proximity detection and alert technology for safe construction equipment operation. *Construction Management and Economics*, 31(6), 636-646.
- Martinez, P., Al-Hussein, M. et Ahmad, R. (2019). A scientometric analysis and critical review of computer vision applications for construction. *Automation in Construction*, 107. Tiré de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580519305758>
- Mine Safety and Health Administration. (2015). *Proximity detection systems for continuous mining machines in underground coal mines* (Publication n° Docket No. MSHA-2010-0001). Tiré de <https://www.federalregister.gov/documents/2015/01/15/2015-00319/proximity-detection-systems-for-continuous-mining-machines-in-underground-coal-mines>
- Mine Safety and Health Administration. (2018). Proximity detection and collision warning information from technical support Tiré de <https://www.msha.gov/proximity-detectioncollision-warning-information-technical-support>
- Occupational Safety and Health Administration. (2018). *Preventing backovers in construction industry* .Tiré de <https://www.osha.gov/doc/topics/backover/>
- Occupational Safety and Health Administration. (2017). *Worker safety series: Construction, United States Department of Labor* Tiré de <https://www.osha.gov/Publications/OSHA3252/3252.html>
- Oh, K., Park, S., Seo, J., Kim, J.-G., Park, J., Lee, G. et Yi, K. (2019). Development of a predictive safety control algorithm using laser scanners for excavators on construction sites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 233(8), 2007-2029.
- Oloufa, A. A., Ikeda, M. et Oda, H. (2003). Situational awareness of construction equipment using GPS, wireless and web technologies. *Automation in Construction*, 12(6), 737-748.
- Park, J., Marks, E., Cho, Y. K. et Suryanto, W. (2015). Performance test of wireless technologies for personnel and equipment proximity sensing in work zones. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(1). Tiré de [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001031](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001031)
- Park, M.-W. et Brilakis, I. (2012). Construction worker detection in video frames for initializing vision trackers. *Automation in Construction*, 28, 15-25.
- Ruff, T. (2006). Evaluation of a radar-based proximity warning system for off-highway dump trucks. *Accident Analysis & Prevention*, 38(1), 92-98.
- Ruff, T. M. (2007). *Recommendations for evaluating and implementing proximity warning systems on surface mining equipment*. Tiré de <https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/2007-146.pdf>
- Schiffbauer, W. H. (2002). An active proximity warning system for surface and underground mining applications. Tiré de <https://pdfs.semanticscholar.org/7272/7f4d07297138fafa889f4f3760a33c86c2b4.pdf>
- Seo, J., Han, S., Lee, S. et Kim, H. (2015). Computer vision techniques for construction safety and health monitoring. *Advanced Engineering Informatics*, 29(2), 239-251.
- Shahi, A., Aryan, A., West, J. S., Haas, C. T. et Haas, R. C. (2012). Deterioration of UWB positioning during construction. *Automation in Construction*, 24, 72-80.

- Son, H., Seong, H., Choi, H. et Kim, C. (2019). Real-time vision-based warning system for prevention of collisions between workers and heavy equipment. *Journal of Computing in Civil engineering*, 33(5), 04019029.
- Teizer, J. (2015). *Magnetic field proximity detection and alert technology for safe heavy construction equipment operation: Proceedings of the 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction* (vol. 32, p. 1). Oulu, Finlande . Tiré de <https://pdfs.semanticscholar.org/55ff/fa52f877ae663f9b12c9db8a9ce359b6c280.pdf>
- Teizer, J., Allread, B. S., Fullerton, C. E. et Hinze, J. (2010). Autonomous pro-active real-time construction worker and equipment operator proximity safety alert system. *Automation in Construction*, 19(5), 630-640.
- The National Institute for Occupational Safety and Health. (2017). *Construction equipment visibility: Diagram lookup*. Tiré de <https://www.cdc.gov/niosh/topics/highwayworkzones/bad/imagelookup.html>
- The National Institute for Occupational Safety and Health. (2018). *Engineering considerations and selection criteria for proximity warning systems for mining operations*. Tiré de <https://www.cdc.gov/niosh/mining/content/pwsselection.html>
- U.S. Department of Labor. (2016). *2014 Census of fatal occupational injuries (revised data): Industry by event or exposure, 2014*. Tiré de <http://www.bls.gov/iif/oshwc/foi/cftb0286.pdf>
- Wang, J. et Razavi, S. N. (2015). Low false alarm rate model for unsafe-proximity detection in construction. *Journal of Computing in Civil engineering*, 30(2), 04015005.
- Wu, F., Vibhute, A., Soh, G. S., Wood, K. L. et Foong, S. (2017). A compact magnetic field-based obstacle detection and avoidance system for miniature spherical robots. *Sensors*, 17(6), 1231.
- Zhou, C., Li, J., Damiano, N., Carr, J. et Noll, J. (2019). Influence of trailing cables on magnetic proximity detection systems. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 36(2), 277-284.

ANNEXE A

La présente section présente d'une manière plus détaillée l'ensemble des systèmes commercialement disponibles étant dédiés à la détection de proximité dans d'autres secteurs industriels que la construction.

Afin de faciliter la lecture du document, les systèmes recensés sont présentés dans des tableaux selon les différentes catégories de technologies de détection de proximité mises en œuvre (voir tableau 9 à 12). De plus, pour chaque manufacturier les détails sont fournis pour chacun des systèmes à savoir le secteur industriel, le nom du produit commercial ainsi que son principe de fonctionnement.

A.I Systèmes basés sur la technologie de détection radiofréquence

Tableau 9. Systèmes disponibles dans le commerce destinés à d'autres secteurs que la construction, étant basés sur la technologie de détection radiofréquence

Compagnie	Secteur	Produit	Principe de fonctionnement	Référence
Newtrax	Mine souterraine de roche dure	MineProx	<ul style="list-style-type: none"> - Le système comprend : (1) l'émetteur-récepteur radio du véhicule, (2) l'interface d'utilisateur (dans le véhicule), (3) la lampe du casque du piéton activable à la proximité, (4) des balises fixes - Les opérateurs d'équipement mobiles sont avertis lorsque d'autres véhicules, des travailleurs ou des obstacles fixes apparaissent dans une zone de proximité prédéfinie. - Il est possible d'envoyer un message par le travailleur via la lampe de son casque à l'opérateur et de déclencher l'arrêt complet du véhicule. - Il permet de détecter un travailleur tombé à terre et d'envoyer des messages d'alerte. 	https://www.newtrax.com/solution/proximity-detection-collision-avoidance/
Modular Mining Systems, Inc.	Industrie minière	MineAlert™	<ul style="list-style-type: none"> - Le système est basé sur la technologie DSRC (Dedicated Short-Range Communications). - Il détermine le risque de collision d'un véhicule avec un obstacle en fonction de la vitesse de déplacement, de la direction instantanée et de la trajectoire prévue. - Il alerte les opérateurs sur les dangers potentiels en temps réel à l'aide d'un écran d'affichage). 	https://www.modularmining.com/our-solutions/safety/
Advanced Microwave Engineering	Entrepôt, atelier (Chariots élévateurs)	EGOpro Safe MOVE	<ul style="list-style-type: none"> - Le système comprend : (1) l'unité de contrôle composé des alarmes visuelles et sonore, d'autodiagnostic d'alertes affichées à l'écran, de journal des enregistrements, (2) le capteur multifonctionnel avec une détection à 360°, 2 zones d'alarme (préavertissement jusqu'à 50 m et avertissement jusqu'à 5 m), (3) le marqueur actif intégré à l'ÉPI des piétons grâce à un kit d'accessoires. Le marqueur comprend une version spéciale pour les casques de sécurité. - Le système signale en temps réel au conducteur la présence et la position de toute personne portant un marqueur actif dans une zone prédéfinie. - Il permet la détection automatique de plusieurs tags, 	https://www.meol.it/en/ego-pro-safety/egopro-safe-move/

Compagnie	Secteur	Produit	Principe de fonctionnement	Référence
			<ul style="list-style-type: none"> - Il peut aussi être utilisé en tant qu'un système d'anticollision de véhicule à véhicule. - Lorsqu'un travailleur équipé d'un marqueur actif se trouve à proximité d'un véhicule à l'arrêt, le véhicule demeure bloqué et ne peut pas être redémarré tant que le travailleur n'a pas quitté la zone. - Le système est aussi adaptable aux domaines suivants : papeteries, mines, aciéries, construction, port et terminal. 	
Claitec	Entrepôt, atelier (Chariots élévateurs)	Pedestrian Alert System (PAS)	<ul style="list-style-type: none"> - Le système utilise des signaux radio de basse fréquence pour générer une zone de sécurité autour du véhicule. - Le système comprend : (1) le portecleé électronique (T - 10 TAG ou T - 10R TAG) qui rend le travailleur visible au détecteur et avertit le conducteur de la proximité du piéton, (2) l'activateur RFID qui fournit une indication immédiate de l'emplacement et de l'état d'un marqueur, (3) Antenne de vérification qui permet de vérifier le bon fonctionnement du système. - Il permet d'avertir les conducteurs de chariots élévateurs lorsqu'il détecte un piéton à une distance réglable de 1 à 6,5 mètres - Il permet le freinage du véhicule, si le modèle du chariot élévateur le permet. - Le système PAS est applicable aux chariots élévateurs avec des charges jusqu'à 3,5 tonnes. Les vitesses optimales du fonctionnement de ce système se situent entre 6 à 8 km/h. 	https://claitec.com/en/portfolio/pedestrian-alert-system-pas/
Essensium	Entrepôt, atelier (Chariots élévateurs)	SafeTrack™ utilisant le système Essensium Positioning System (PES)	<ul style="list-style-type: none"> - Le système combine la détection de la position du véhicule et la télémétrie entre les nœuds radio afin de fournir une approche multicouche de la prévention avec redondance intégrée. - Une alarme sonore et un indicateur visuel à l'intérieur de la cabine avertissent les conducteurs lorsqu'ils enfreignent les distances de sécurité - Le système utilise l'approche RF large bande sur bande étroite qui combine les avantages du comportement à bande étroite et à bande large pour offrir à la fois la précision d'un système ULB très précis associé à une longue portée de détection. 	http://www.essensium.com/

Compagnie	Secteur	Produit	Principe de fonctionnement	Référence
			<ul style="list-style-type: none">- Le mode d'opération du système comprend : (1) la transmission d'un signal radio entre un nœud mobile et les nœuds de référence connu sous une forme d'aller-retour, (2) le calcul du temps nécessaire au signal radio pour se déplacer entre les nœuds radio qui permet de déterminer la distance entre le nœud mobile et chacun des nœuds de référence, (3) le convertissement des mesures de distance en position des nœuds par la fonction de la localisation du serveur de suivi.- Le système présente l'avantage de fonctionner dans une configuration très dense.- La résolution du système comprend : (1) une portée allant jusqu'à 800m, (2) un temps de réponse inférieur à 3 nano seconde, (3) une précision de distance inférieure à 1 mètre.	

A.II Systèmes basés sur la technologie de détection à ultrasons

Tableau 10. Systèmes disponibles dans le commerce destinés à d’autres secteurs que la construction, étant basés sur la technologie de détection à ultrasons

Compagnie	Secteur	Produit	Principe de fonctionnement	Référence
Safety Improvement Systems	Entrepôt, atelier (Chariots élévateurs)	Système passif Safe & Alert	<p>- Le système comprend (1) le capteur à ultrason (CySens) qui est capable de détecter tout objet jusqu’à 4 mètres en arrière de l’engin (perpendiculairement du point d’émission de l’onde) et jusqu’à 1,5 mètre pour les sections latérales. La combinaison des sections centrale et latérale génère une couverture de détection d’environ 180 ° par rapport à la partie arrière de l’engin, (2) l’écran d’affichage « MiniMind » qui fonctionne comme une unité centrale traitant les signaux entrants reçus du capteur, fournissant ainsi à l’opérateur des signaux visuels et acoustiques.</p> <p>- Il s’agit d’un système d’aide à la manœuvre de recul pour chariots élévateurs et véhicules industriels. Il avertit le conducteur par des signaux visuels et acoustiques dont la fréquence devient plus intense à l’approche de l’obstacle.</p> <p>- Le système propose 3 configurations prédéfinies pouvant être sélectionnées en fonction des besoins de l’environnement de travail. Chaque configuration propose une distance spécifique de détection prédéfinie : 150 cm x 100 cm, 150 cm x 150 cm, 150 cm x 200 cm.</p>	https://www.sis-safety.com/en/prodotto/safe-alert
		Système passif Safe & Alert +	<p>- Le système est composé du capteur à ultrason CySens et l’écran d’affichage MiniMind comme le système passif Safe & Alert</p> <p>- Le système est destiné aux véhicules industriels de moyenne et de grande taille nécessitant une détection plus large lors des manœuvres de recul.</p> <p>- Le conducteur est alerté par des signaux sonores et visuels à l’approche d’un obstacle.</p> <p>- Le système propose 6 configurations :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les préréglages 1-2-3 définissent un mode de détection étendu, avec une couverture supérieure à 200 cm, adapté aux véhicules particulièrement volumineux ainsi qu’aux grandes zones de manœuvre; 	https://www.sis-safety.com/en/prodotto/safe-alert-plus

Compagnie	Secteur	Produit	Principe de fonctionnement	Référence
			<ul style="list-style-type: none"> Les pré-réglages 4-5-6 définissent un mode de détection standard, avec une couverture de 150 cm. 	
		Système actif Safe&Stop	<ul style="list-style-type: none"> - Le système est composé du capteur à ultrason CySens et l'écran d'affichage MiniMind comme le système passif Safe & Alert. - C'est d'un système d'assistance active à la manœuvre de recul. - Le conducteur est alerté par des signaux sonores et visuels lorsqu'un obstacle est détecté dans la zone de la manœuvre. - Le ralentissement et le blocage automatiques de l'engin sont activés, évitant ainsi le risque de collision. - Il est possible de définir des distances de détection en fonction des besoins du milieu de travail. Les sections latérales peuvent être activées ou désactivées en fonction des besoins de détection, avec une zone centrale de 150 cm x 400 cm, et zone latérale de 350 cm x 250 cm. 	https://www.sis-safety.com/en/prodotto/prodotto-1-en
		Système actif Safe&Stop +	<ul style="list-style-type: none"> - Le système est composé de deux capteurs synchronisés à ultrason CySens et l'écran d'affichage MiniMind. - Le système est destiné aux véhicules de plus de 1,5 mètre de large qui nécessite la surveillance d'une zone plus large lors de leur manœuvre de recul. - Le conducteur est averti par des signaux sonores et visuels dans la cabine, tandis que le ralentissement et le blocage de l'engin sont activés automatiquement pour éviter la collision avec un obstacle. - Les capteurs sont capables de détecter tout objet situé jusqu'à 4 mètres perpendiculairement au point d'émission et jusqu'à 2 mètres dans les sections latérales procurant ainsi une couverture de détection de 180 ° par rapport à l'arrière de l'engin. - Il est possible de définir les distances de détection en fonction des besoins de l'environnement de travail. Les sections latérales peuvent être activées ou désactivées. La couverture de la zone centrale est de 200 cm x 400 cm, et zone latérale de 400 cm x 250 cm. 	https://www.sis-safety.com/en/prodotto/safe-stop-plus

A.III Systèmes basés sur technologie de détection électromagnétique

Tableau 11. Systèmes disponibles dans le commerce destinés à d'autres secteurs que la construction, étant basés sur la technologie de détection électromagnétique

Compagnie	Secteur	Produit	Principe de fonctionnement	Référence
Komatsu	Mine souterraine, mine à ciel ouvert	Système de proximité de zone intelligente JOY	Approuvé par MSHA (numéro de certification 18-A13003-0) - Un système basé sur des technologies électromagnétiques avec deux composants de base : (1) le groupe émetteur positionné sur l'équipement, (2) le dispositif portable personnel (PWD) porté par les travailleurs piétons. - Le système maintient les zones d'opération autour de l'équipement : la Zone 1 étant la zone d'alerte initiale et signalant une personne proche de l'équipement, la Zone 2 (la zone d'arrêt) qui désactive diverses fonctions de la machine lorsqu'il détecte une personne dans cette zone.	https://mining.komatsu/technology/proximity-detection/smart-zone-proximity-detection
Matrix Design Group LLC	Industrie minière	IntelliZone® Coal (mine souterraine) IntelliZoneHD (mine de métal ou non-métal) IntelliZone® Industrial (environnement d'exploitation industriel spécial)	Système approuvé par MSHA - Un système basé sur des technologies électromagnétiques qui comprend : (1) l'émetteur installé sur le véhicule, (2) le localisateur porté par les travailleurs piétons, (3) la caméra installée dans la cabine de conducteur. - Le système définit et maintient des zones de sécurité autour du véhicule : (a) la zone d'opération permet au piéton de se tenir debout ou à genoux dans une position sécuritaire sans déclencher l'alarme, (b) la zone de mise en garde avec une tonalité sonore et une lumière jaune clignotant sur le localisateur, (c) la zone d'arrêt qui désactive immédiatement le mouvement du véhicule quand le localisateur est détecté dans cette zone et un avertissement de tonalité constante et lumière rouge clignotante sur l'émetteur et le localisateur.	https://www.matrixteam.com/
GE Transportation	Mine souterraine	Digital Mine - GE CAS Underground	Un système magnétique à très basse fréquence qui permet la détection autour des virages et à travers les strates pour alerter les collisions potentielles.	http://www.getransportation.com/mining-solutions

A.IV Systèmes basés sur une combinaison de technologies de détection**Tableau 12. Systèmes disponibles dans le commerce destinés à d'autres secteurs que la construction, étant basés sur une combinaison de technologies de détection**

Compagnie	Secteur	Produit	Principe de fonctionnement	Référence
Becker Mining Systems	Industrie minière	Système de détection de proximité (PDS) Système de détection de collision (CAS)	<ul style="list-style-type: none"> - Le système est proposé sous une forme personnalisable avec une grande modularité de la programmation. Il est présenté sous deux configurations : (1) le système simple avec la détection UHF et unité d'affichage d'interface utilisateur, (2) le système complet doté de plusieurs points de détection et comprenant une solution tritechnologie (UHF, radar et électromagnétique) adaptable selon les besoins du milieu de travail. - Le système avertit l'opérateur de la présence et du nombre de personnes et de véhicules à proximité du véhicule. - Une notification bidirectionnelle et la messagerie d'alerte contre les collisions sont possibles : véhicule à personne, personne à véhicule et véhicule à véhicule. 	https://www.becker-mining.com/en/products/smart-com/proximity-detection-system-pds
Guardvant	Industrie minière	ProxGuard	<ul style="list-style-type: none"> - Le système est basé sur la combinaison de la technologie de radar et de vidéo intégrée (8 capteurs radar et 8 caméras). - L'opérateur est immédiatement alerté dès la détection d'objets dans son angle de voisinage immédiat via une alarme sonore et les vibrations de son siège. - L'écran d'affichage de la cabine permet plusieurs vues d'une manière simultanée. 	https://www.guardvant.com/proxguard/
GE Transportation	Mine à ciel ouvert	Digital Mine - CAS Surface	<ul style="list-style-type: none"> - Il s'agit d'une infrastructure basée sur une variété de méthodes de détection de proximité : GPS, les radiofréquences, les magnétiques à très basse fréquence et les caméras. Selon l'engin et le domaine, l'association de plusieurs de ces solutions est proposée. - Le système permet de générer des rapports et des analyses pour surveiller et gérer le comportement des opérateurs. Les rapports seront par la suite utilisés pour améliorer le comportement et la conformité des mineurs. - Le système ne prend pas le contrôle du véhicule. Il est uniquement destiné à faire partie d'un vaste protocole de gestion de risque à travers la gestion globale de la mine. 	http://www.getransportation.com/mining-solutions

Compagnie	Secteur	Produit	Principe de fonctionnement	Référence
Hexagon mining	Industrie minière	Système de prévention de collision avec 3 configurations : CAS-Foundation CAS-Advantage CAS-Pro	<ul style="list-style-type: none"> - Le système est basé sur l’association des technologies GNSS et de radiofréquences et un écran de cabine qui avertit l’opérateur. - Les rapports générés permettent une interprétation des données pour des améliorations continues de la sécurité de la mine. - Le système, sous la configuration CAS-Pro, associe des technologies GNSS et de radiofréquences avec des solutions de suivi par radar qui permettent de supporter un mécanisme d’intervention qui arrête le véhicule lorsqu’un opérateur ne réagit pas correctement à un avertissement. 	https://hexagonmining.com/solutions/safety-portfolio/collision-avoidance

ANNEXE B

Les recherches effectuées à l'occasion de la présente expertise ont aussi permis d'identifier des systèmes anticollisions par détection de proximité qui sont dédiés au secteur automobile. Par ailleurs, quelques systèmes centralisés anticollision par la détection de proximité ont aussi été repérés. Ces systèmes sont respectivement présentés dans les tableaux 13 et 14 pour chaque manufacturier, tout en détaillant le secteur industriel visé, le nom du produit commercial et le principe de fonctionnement des systèmes.

Tableau 13. Systèmes anticollision par la détection de proximité, étant destinés au secteur de l'automobile

Compagnie	Secteur	Produit	Principe de fonctionnement	Référence
Leddartech	Automobile	Leddar IS16	<ul style="list-style-type: none"> - Le système est basé sur un faisceau de 45°, produit par des impulsions lumineuses. - Il offre 16 segments de détection indépendants avec la capacité d'acquisitions simultanées et de distinction latérale des obstacles. - Il permet de détecter, de localiser et de mesurer les objets avec une portée allant jusqu'à 50 mètres et procure une fréquence de rafraîchissement des données jusqu'à 50 Hz. - La technologie de détection est associée à un écran pour la configuration et le contrôle des opérations. 	https://leddartech.com/fr/lidar/capteur-industriel-is16/
		Leddar M16	<ul style="list-style-type: none"> - Le système est basé sur la combinaison d'une illumination flash à faisceau large avec 16 segments de détection (des faisceaux de 9° à 95° avec une largeur et une hauteur variable). - Le système possède une capacité de distinction latérale des obstacles et d'acquisition de mesures de distance de manière continue avec des taux d'acquisition des données allant jusqu'à 100 Hz et une portée de 0 à 100 mètres. <ul style="list-style-type: none"> • Le modèle M16-LSR est doté d'une source laser pour une portée plus élevée et un champ de vision vertical plus étroit et mieux défini. • Le modèle M16-LED est basé sur une lumière DEL infrarouge à faisceau large illuminant d'une portée de 100 mètres. 	https://leddartech.com/fr/lidar/module-capteur-m16-multisegment/
Velodyne Lidar	Automobile, camionnage, drone, robotique, cartographie, ville intelligente, sécurité	Surveillance de l'environnement d'engin mobile avec plusieurs systèmes : Alpha Puck, Velarray, Vela Dome,	<ul style="list-style-type: none"> - Le système utilise des rayons laser pour créer une représentation 3D de l'environnement balayé. Le capteur émet des ondes lumineuses pulsées émises par un laser dans l'environnement. Ces impulsions rebondissent sur les objets environnants et retournent au capteur. Le capteur utilise le temps nécessaire à chaque impulsion pour revenir au capteur afin de calculer la distance parcourue. Répéter ce processus des millions de fois par seconde crée une carte 3D en temps réel de l'environnement. Un ordinateur de bord utilise en suite cette carte en 3D de l'environnement pour assister la navigation. <ul style="list-style-type: none"> • Alpha Puck : un système avec une portée de 300m, champ de vue horizontal de 360° et vertical de 40°, 	https://velodynelidar.com/products.html

Compagnie	Secteur	Produit	Principe de fonctionnement	Référence
		Ultra Puck, Puck, HDL-32E, HDL-64E	<ul style="list-style-type: none"> • Velarray : un système avec une forme compacte pour une meilleure intégration dans la carrosserie du véhicule avec une imagerie directionnelle de jour comme de nuit, • VelaDome : un système spécialement conçu pour la détection de proximité à haute résolution, avec un champ de vue à 180° x 180° et la capacité de détecter des objets aussi proches que 0,1 mètre, • Ultra Puck : un système d'une forme compacte avec une portée de 200 mètres et un champ de vue horizontal de 360° et vertical de 40°, • Puck : un système d'une forme compacte avec une portée de 100 mètres, • HDL-32E : un système d'une portée de 80 à 100 mètres avec une précision de ± 2 cm, possédant 32 canaux et un champ de vue horizontal de 360° et vertical de + 10° à -30°, • HDL-64E : un système d'une portée de 120 mètres, possédant 64 canaux et un champ de vue horizontal de 360° et vertical de 26,9° et une résolution angulaire de 0,08° et verticale de 0.4°. 	
Mobileye	Transport, automobile	Mobileye Série 5 Mobileye Série 6	<p>- Le système comprend (1) un capteur de vision avec des capacités de traitement d'image (SeeQ2®), (2) une alarme sonore en cas de détection de proximité, (3) un écran (Eye Watch™), ainsi qu'une unité de contrôle pour les alertes de changement de direction et la mesure des distances de sécurité.</p> <p>- Le système permet de prévenir les collisions frontales.</p>	https://www.mobileye.com/fr-fr/produits/mobileye-serie-6/
	Transport, véhicule lourd	Mobileye Shield	<p>- Le système repose sur plusieurs capteurs de visionnage avec la capacité de traitement d'image et la reconnaissance de piéton et cyclistes qui sont associés à 3 écrans installés dans la cabine et des alarmes sonores, visuelles dans la cabine et vibratoires dans le siège du conducteur.</p> <p>- Le système permet de détecter la proximité d'objets et de personnes dans les angles morts du véhicule.</p> <p>- L'intelligence artificielle sur laquelle repose le traitement d'image permet de distinguer les personnes des objets.</p>	https://www.mobileye.com/fr-fr/produits/mobileye-shield/

Tableau 14. Systèmes centralisés d'anticollision par la détection de proximité

Compagnie	Secteur	Produit	Principe de fonctionnement	Référence
Worktech	Gestion de la sécurité et la prévention des risques	Geolocation solution	<ul style="list-style-type: none"> - Le système est basé sur des technologies GPS. - Il permet de suivre des personnes tout en surveillant simultanément l'ensemble de l'équipage. - Il fournit des informations en temps réel sur l'état et l'emplacement des travailleurs. 	http://www.worktech.com/solutions/geolocation/
Mworker	Logistique, prévention des risques	Système de géolocalisation	<ul style="list-style-type: none"> - Le système permet le suivi en temps réel de l'ensemble des ressources mobiles et l'analyse des trajets effectués, ainsi que la surveillance des activités sur le terrain. - Il permet de contrôler des ressources et d'envoyer des alertes en cas de problèmes de sécurité. - Il permet le suivi de conteneurs, d'outillages, de remorques et d'engins non alimentés grâce à la RFID. 	https://www.mworker.com/



NOTE AU LECTEUR

Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.
Les résultats des travaux publiés dans ce document n'ont pas fait l'objet d'une révision
par les pairs.