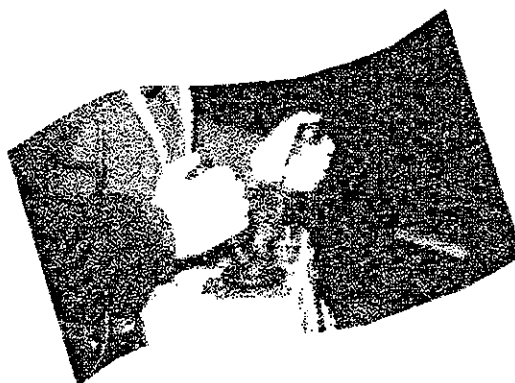


**Étude des systèmes
de détection d'humains
et d'anticollision
pour des véhicules
opérant en milieu minier**



**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

Richard Hurteau
Marcel Saint-Amant
Jacques Côté

Septembre 1995 R-109

RAPPORT



IRSST
Institut de recherche
en santé et en sécurité
du travail du Québec

La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST) est un organisme de recherche scientifique voué à l'identification et à l'élimination à la source des dangers professionnels, et à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes. Financé par la CSST, l'Institut réalise et finance, par subvention ou contrats, des recherches qui visent à réduire les coûts humains et financiers occasionnés par les accidents de travail et les maladies professionnelles.

Pour tout connaître de l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par la CSST et l'Institut.

Les résultats des travaux de l'Institut sont présentés dans une série de publications, disponibles sur demande à la Direction des communications.

Il est possible de se procurer le catalogue des publications de l'Institut et de s'abonner à *Prévention au travail* en écrivant à l'adresse au bas de cette page.

ATTENTION

Cette version numérique vous est offerte à titre d'information seulement. Bien que tout ait été mis en œuvre pour préserver la qualité des documents lors du transfert numérique, il se peut que certains caractères aient été omis, altérés ou effacés. Les données contenues dans les tableaux et graphiques doivent être vérifiées à l'aide de la version papier avant utilisation.

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec

IRSST - Direction des communications
505, boul. de Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1 551
Télécopieur: (514) 288-7636
Site internet : www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche en santé
et en sécurité du travail du Québec,

**Étude des systèmes
de détection d'humains
et d'anticollision
pour des véhicules
opérant en milieu minier**

Richard Hurteau

Département de génie électrique et de génie informatique,
École Polytechnique

Marcel Saint-Amant

Centre canadien d'automatisation et de robotique minières

Jacques Côté

Département de génie électrique et de génie informatique,
École Polytechnique

**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

RAPPORT

1. Introduction: rappel des objectifs de recherche

La grande majorité des opérations minières en exploitation sont aujourd'hui fortement mécanisées. Dans les mines souterraines à roches dures, le transport du minerai est réalisé par des engins mobiles tel que les chargeur-transporteurs ou les camions. Des camions super-lourds sont utilisés dans les mines à ciel ouvert.

Ces véhicules miniers sont encombrants, possèdent des géométries particulières (articulés) et doivent également exécuter des manoeuvres, par exemple de chargement et de déchargement, dans des milieux restreints et souvent à proximité d'humains. Comme les opérateurs de ces véhicules ont une visibilité très limitée de leur environnement immédiat, ces véhicules sont fréquemment impliqués dans des accidents.

Dans les mines souterraines, les nouvelles technologies de télé-opération et de guidage automatique sont actuellement en cours d'implantation au niveau de prototypes de production. Ces systèmes permettront d'éloigner les opérateurs des zones d'exploitation et par le fait même, de les soustraire à certains risques. Ces véhicules automatisés devront cependant posséder des capacités au niveau de la détection d'humains, d'obstacles et de systèmes d'anticollision. En effet, dans les mines souterraines le même milieu de travail confiné doit être partagé à la fois par les hommes, les différentes machines et les véhicules automatisés.

Le domaine de la robotique et plus particulièrement la robotique mobile connaît une activité de recherche grandissante autour du développement de robots *intelligents* ou *autonomes*. Ces robots, basés sur des systèmes de perception sophistiqués, auraient la capacité de percevoir leur environnement, de planifier leurs tâches et leur chemin et d'exécuter l'ensemble des mouvements pour réaliser ces tâches. Le problème de détection d'humains et d'obstacles est un problème central autour duquel s'articule de nombreux travaux de recherche.

De nombreux capteurs et de nombreux systèmes sont proposés pour la détection d'humains et d'obstacles. Différents principes physiques sont utilisés comme par exemple l'écho sonar, l'écho électromagnétique, l'effet Doppler électromagnétique, la détection de proximité par reflet lumineux ou infrarouge, la télémétrie optique. Dans le cadre de ce projet, nous nous proposons d'analyser le potentiel de ces technologies pour les applications dans des environnements miniers de type souterrain et à ciel ouvert.

Dans ce contexte d'implantation rapide des véhicules automatisés dans les mines, cette étude porte sur les trois objectifs suivants:

1. Définir et analyser les problèmes de la détection d'humains, d'obstacles et d'anticollision dans les mines souterraines et à ciel ouvert,
2. Réaliser un état de l'art des systèmes de détection d'obstacles au niveau industriel et au niveau recherche,
3. Évaluer expérimentalement certaines technologies de détection pour analyser

leur potentiel dans des environnements miniers (par exemple les systèmes basés sur la vision artificielle).

Notons que généralement, la littérature scientifique considère implicitement que le problème de détection d'obstacles inclut celui de la détection d'humains. Dans ce qui suit, nous supposons également, sauf indication contraire, que les humains font partie des obstacles à détecter.

2. Problématique de la sécurité des humains dans une mine

Les véhicules miniers

Parmi les nombreux véhicules utilisés dans les mines, cette étude ne concerne que les véhicules sur roues et plus spécifiquement les véhicules de transport et de transbordement montrés à la figure 1.1. Pour les mines souterraines, les véhicules considérés sont le chargeur-transporteur (LHD) et le camion souterrain, et pour les mines à ciel ouvert, le camion super-lourd. Ceci est justifié par le fait que ces types de véhicules sont à court terme des cibles pour l'automatisation. Des techniques de téléopération sont utilisées depuis quelques années pour le chargement des LHD et un système de guidage optique est actuellement en développement dans les mines de la compagnie Noranda pour l'automatisation des LHD et des camions souterrains. Les camions super-lourds font quant à eux l'objet d'étude pour des systèmes de guidage automatique (par exemple le système GPS).

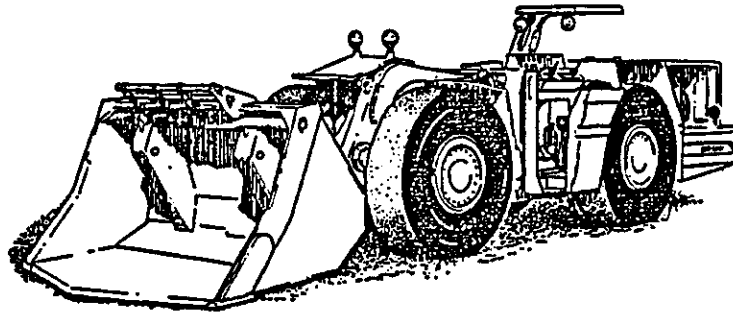
Les caractéristiques de ces véhicules au niveau physique et fonctionnel ainsi qu'une estimation des possibilités d'automatisation sont résumées dans le tableau 1.1.

Etant donné l'encombrement de ces véhicules et l'ensemble des conditions environnementales que l'on retrouve dans les mines, le développement de systèmes de détection d'humains, d'obstacles et d'anti-collision doit être abordé à deux niveaux:

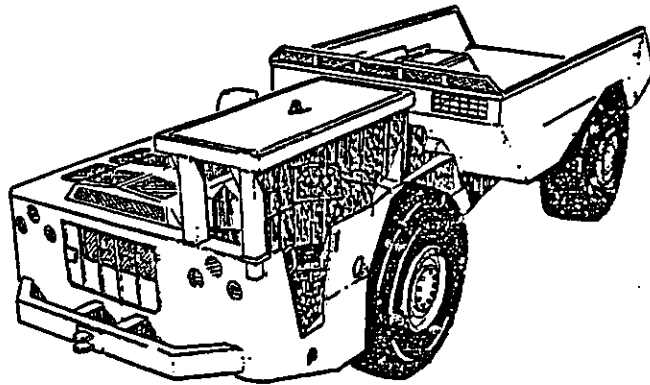
- au niveau du véhicule par le développement et l'utilisation de capteurs pour la détection d'humains et d'obstacles. Les spécifications de ces détecteurs sont reliées aux notions d'espace d'anticipation et de zone de visibilité pour les véhicules.
- au niveau de l'organisation des opérations minières. Les véhicules automatisés doivent opérer dans des zones dont l'accès est strictement contrôlé et supervisé (ZOA: zone d'opération automatisée) .

Espace d'anticipation

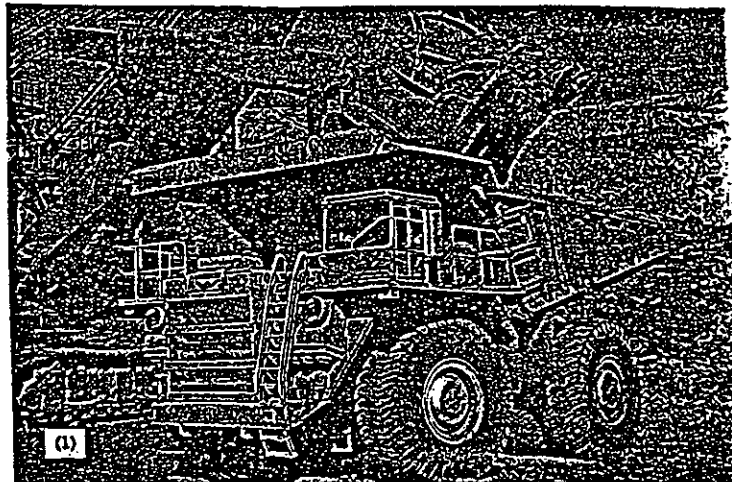
Au niveau d'un véhicule, le problème d'anticollision consiste à s'assurer qu'aucun humain ou objet ne soit présent sur sa trajectoire prévue ou de façon plus précise dans



Chargeur-transporteur



Camion souterrain



Camion super-lourd

Figure 1.1: Véhicules miniers

Véhicules	Caractéristiques physiques	fonction	automatisation à court terme
LHD	articulé 4 roues motrices profil bas godet a l'avant	chargement déchargement accostage hallage	automatisation complète sauf le chargement
Camion souterrain	articulé 4 roues motrices profil bas benne à l'arrière	chargement passif déchargement accostage hallage	automatisation complète
Camion super-lourd	monobloc 2 roues motrices et 2 roues directrices profil haut benne à l'arrière	chargement passif déchargement accostage hallage	automatisation complète

Tableau 1.1: Caractéristiques des véhicules miniers

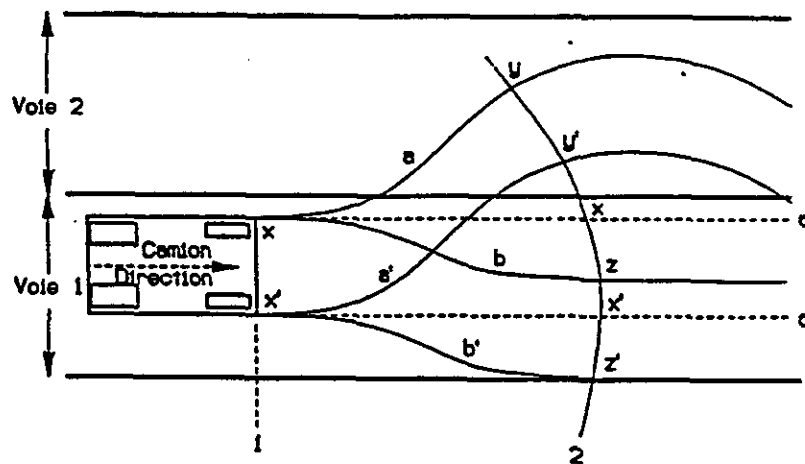
son espace d'anticipation. Cet espace d'anticipation représente le volume qu'occupera le véhicule en mouvement entre le moment de la détection d'un obstacle (incluant les humains) et la fin de toute manoeuvre d'évitement possible. Cet espace a une structure et une forme qui varient avec la vitesse du véhicule, son rayon de braquage instantané, ses propriétés cinématiques et dynamiques et les caractéristiques de la voie de roulement (ex. pente, adhérence, etc.), les frontières de la surface de roulement et la disposition des autres obstacles.

La zone inévitable de l'espace d'anticipation d'un chargeur-transporteur et d'un camion souterrain correspond assez étroitement à sa distance d'arrêt le long de sa trajectoire anticipée. Cela est dû au fait que le mouvement du véhicule est restreint par l'étroitesse des galeries minières et cet espace occupe donc toute la largeur de la galerie.

L'analyse de l'espace d'anticipation d'un camion super-lourd est plus complexe. La figure 1.2 illustre cet espace qui est en forme de fuseau très allongé et asymétrique. Cette forme complexe est liée au fait que les routes sont suffisamment larges pour permettre des manoeuvres d'évitement.

Zone de visibilité

Le système de détection d'obstacles doit s'assurer que la zone d'anticipation du véhicule est libre de tout objet. Cette capacité de voir les objets est définie par la



LEGENDE

Rem.: Les lettres avec apostrophe sont associées au coin avant droit du camion.

- a- Trajectoire du coin avant gauche pour une manoeuvre d'évitement vers la voie de gauche
- b- Trajectoire du coin avant gauche pour une déviation rapide et maximale vers la droite.
- c- Trajectoire planifiée du coin avant gauche.
- x- Position au départ du coin avant gauche du camion.
- y- Position du coin avant gauche du camion au point d'arrêt d'urgence associé à la trajectoire "a".
- z- Position du coin avant gauche du camion au point d'arrêt d'urgence associé à la trajectoire "b".
- w- Position du coin avant gauche du camion au point d'arrêt d'urgence associé à la trajectoire "c" (planifiée).

Figure 1.2: Espace d'anticipation d'un camion super-lourd

zone de visibilité.

La présence du godet sur un chargeur-transporteur limite grandement le champ de vue d'un opérateur ou d'un capteur fixé sur le véhicule. Cette zone est illustrée à la figure 1.3 dans le cas où des caméras fixes sont placées en des points relativement bien protégés sur le véhicule. On remarque qu'il est pratiquement impossible de trouver une solution permettant de réduire de façon significative le volume de la zone de visibilité nulle.

Dans le cas du camion souterrain et du camion super-lourd, il est possible d'avoir une vision complète de la surface de roulement en placant des caméras à des points stratégiques. La figure 1.4 illustre cette zone dans le cas où trois caméras sont utilisées.

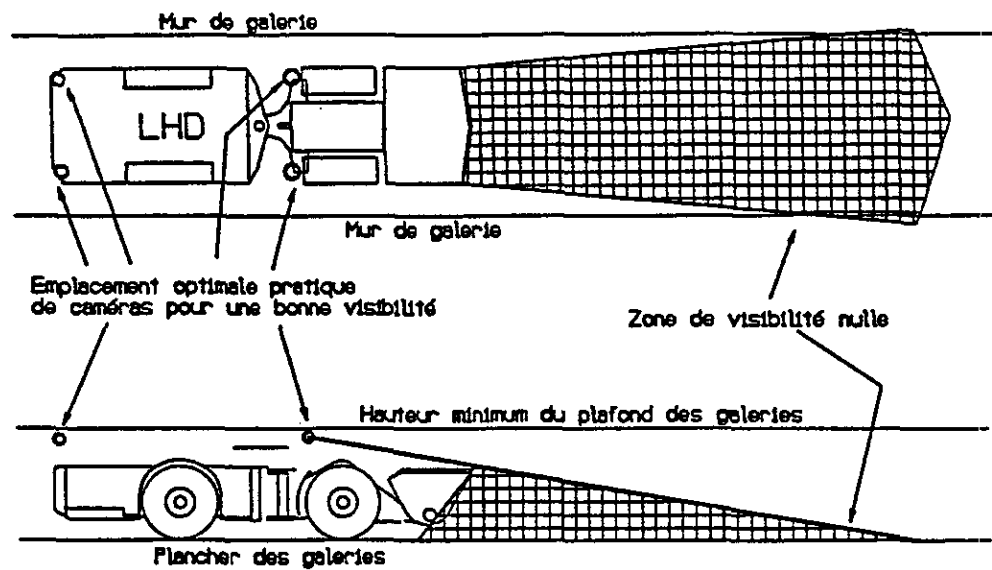


Figure 1.3: Zone de visibilité nulle d'un chargeur-transporteur

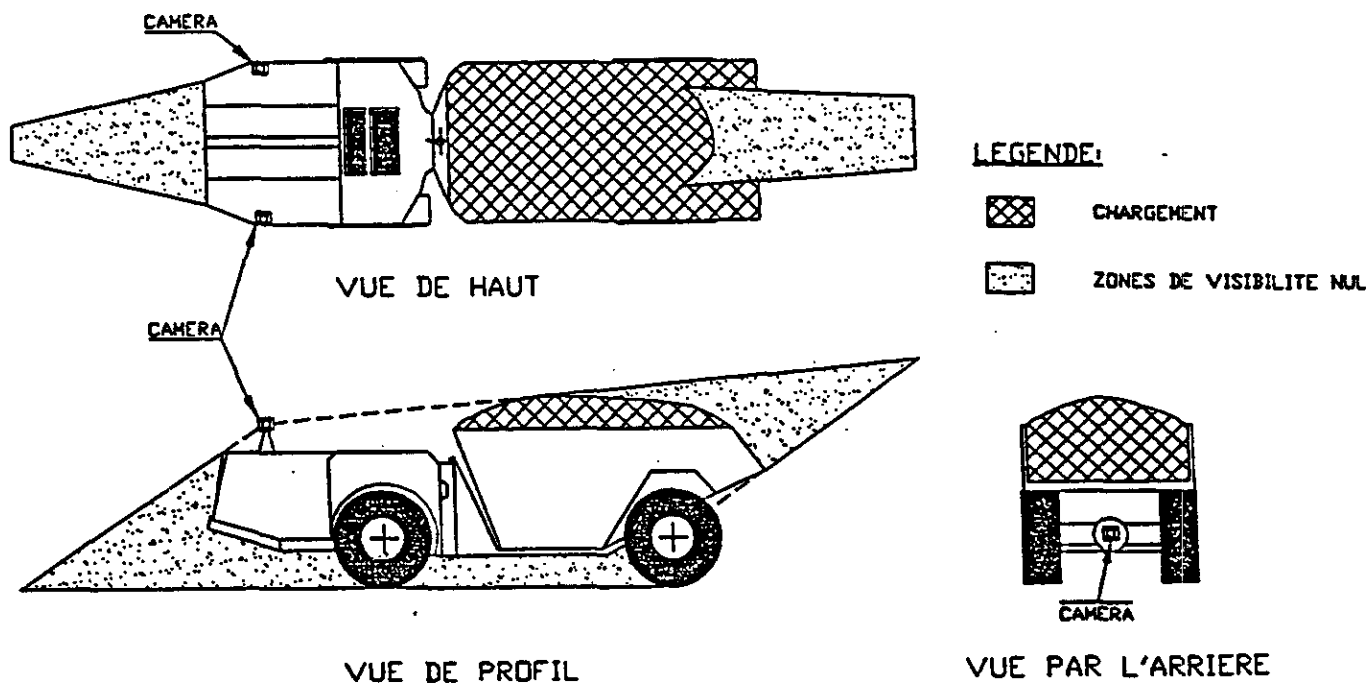


Figure 1.4: Zone de visibilité nulle d'un camion souterrain

La zone d'opération automatique (ZOA)

L'exploitation des mines est actuellement réalisée selon un mode d'opération entièrement manuel. L'introduction de véhicules automatisés ou partiellement automatisés doit entraîner une analyse des activités du personnel en relation avec ces véhicules. Une analyse préliminaire fait ressortir les deux concepts suivants:

- La zone d'opération automatique (ZOA). Les véhicules automatisés doivent opérer dans des zones bien délimitées dont l'accès est correctement contrôlé et supervisé. Dans les mines souterraines, cette zone peut être, dans les cas simples, fermée à clef de sorte qu'aucune personne ne soit présente quand le véhicule opère en mode automatique. Dans des cas plus complexes comme celui des camions souterrains, la zone peut être ouverte c'est-à-dire que des véhicules opérés manuellement interagissent avec des véhicules automatisés. On doit alors définir une série de protocoles pour l'exécution des différentes tâches (par exemple le chargement).

Dans le cas des mines à ciel ouvert, la zone d'opération automatique (ZOA) pour des camions super-lourds couvre pratiquement toute la mine. Une série de scénarios doit alors être envisagée pour la gestion complète de la mine.

- Si le personnel est présent dans la ZOA d'un véhicule, un ou des mécanismes de détection d'humains sécuritaires doivent être mis en place. Ces mécanismes doivent comprendre un protocole de confirmation de la détection permettant à l'humain de savoir que le véhicule est informé de sa présence.

3. Systèmes de détection d'humains et d'obstacles: une activité sensorielle

Le but d'un système de détection d'obstacles et d'anticollision est de permettre au véhicule automatisé (ou à son opérateur) de reconnaître la présence d'obstacles dans sa zone d'anticipation et de réaliser une manoeuvre d'évitement. Ce système comprend donc deux fonctions principales: la première est la fonction de détection des obstacles et la seconde la fonction de réaction permettant d'éviter la collision.

La fonction de détection est liée à une activité sensorielle permettant de percevoir la présence d'objets et de reconnaître parmi ces objets les obstacles incluant les humains. Le schéma fonctionnel illustré à la figure 1.5 dégage deux voies pour la reconnaissance d'obstacles et d'humains, soit la détection directe et la détection par perception et modélisation. La différence établie entre les deux voies de reconnaissance se situe au niveau du type de traitement effectué sur les mesures des capteurs.

- *Reconnaissance par détection directe.* La reconnaissance d'obstacles et d'humains par détection directe implique que les mesures provenant des capteurs

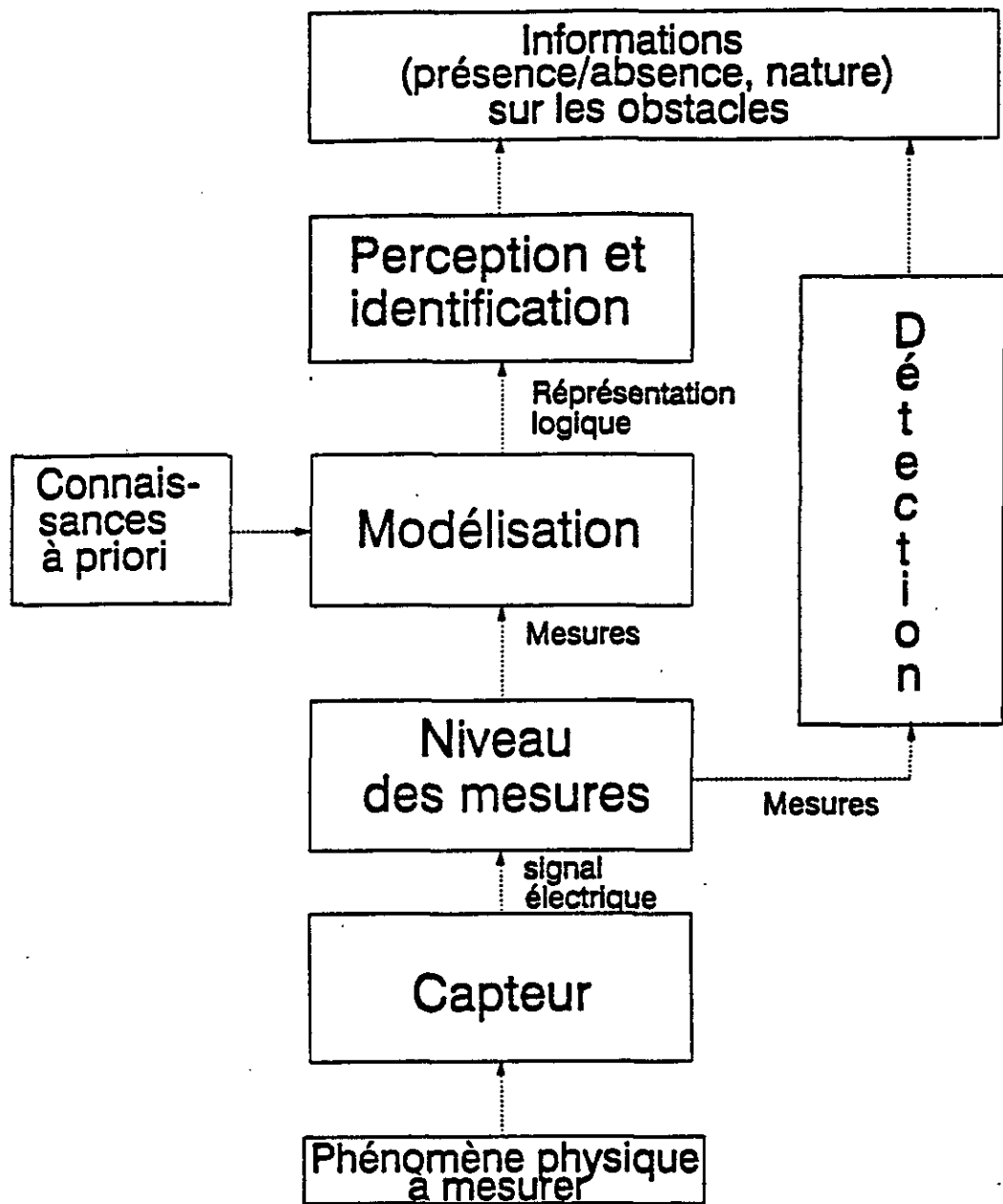


Figure 1.5: Schéma fonctionnel illustrant deux voies pour la reconnaissance d'obstacles et d'humains

permettent directement de déceler leur présence. Les capteurs mesurent alors une caractéristique physique qui indique la présence ou l'absence d'obstacles.

- *Reconnaissance par modélisation et perception.* La seconde voie de reconnaissance d'obstacles et d'humains est basée sur la modélisation et la perception artificielle. Les mesures obtenues à l'aide de capteurs doivent être traitées pour permettre de modéliser et de reconnaître la forme, la composition ou d'autres propriétés naturelles des obstacles ou des humains.

4. Capteurs pour la détection d'obstacles

Les capteurs constituent l'élément de base des systèmes de détection d'obstacles. Une bonne connaissance des capteurs au niveau des principes physiques et de leur technologie est nécessaire pour analyser les propriétés du système de détection.

Une classification des différents capteurs utilisés pour la détection d'obstacles est illustrée à la figure 1.6. On distingue d'abord les capteurs actifs et passifs [Doe90]. Un *capteur passif* mesure une énergie entièrement fournie par le phénomène mesuré tandis que le *capteur actif* fournit une énergie au milieu pour obtenir des mesures. Une seconde distinction est faite entre les capteurs avec et sans contact [Doe90]. Un *capteur avec contact* doit entrer en contact physiquement avec les objets pour les détecter [Har80]. Un *capteur sans contact* mesure à distance une caractéristique physique liée à l'objet. Le type de traitement effectué à partir des mesures de capteurs est également indiqué sur la figure 1.6; les capteurs utilisés pour la détection directe porte l'indice D tandis que ceux utilisés pour la reconnaissance par modélisation et perception portent l'indice M. L'indice MD indique que ces capteurs sont utilisés dans les deux cas.

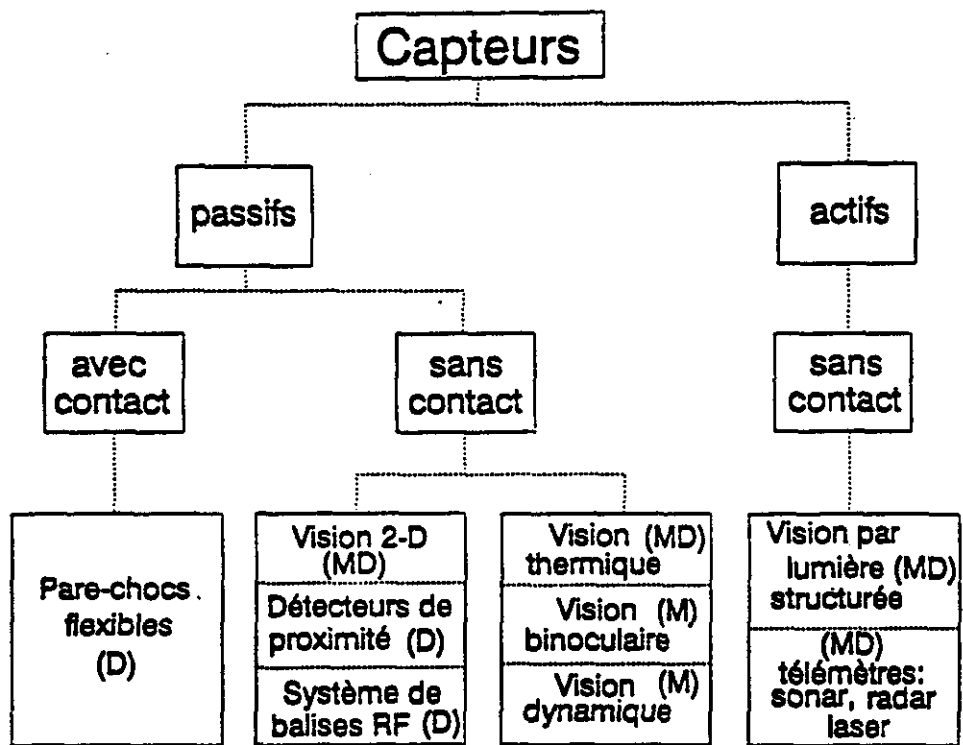


Figure 1.6: Classification des capteurs de détection d'obstacles et d'humains pour des véhicules automatisés

Les tableaux 1.2 et 1.3 résument les caractéristiques des différentes technologies de capteurs. Des indices d'évaluation qualitatifs de ces capteurs sont établis selon l'échelle suivante: très faible, faible, bon, très bon, élevé, très élevé. Tous les critères devraient être élevés à l'exception du coût et des dimensions.

	Caméras et capteurs à infrarouges passifs	Télémètres et imageurs à laser	Radars	Télémètres ultrasoniques
Capteur actif/passif	passif	actif	actif	actif
Avec/sans contact	sans	sans	sans	sans
Mesure	variation de température	distance	distance	distance
Principe de mesure	détection des ondes infrarouges émises par les corps	temps de vol, modulation AM	temps de vol, plusieurs formes de modulation, effet Doppler	temps de vol
Pleine échelle	toutes les températures	mètres à kilomètres	mètres à kilomètres	centimètres à dizaines de mètres
Précision et résolution	faible à très élevée	très élevée	bonne à élevée	faible
Fréquence d'acquisition	très élevée	très élevée	très élevée	faible
Fiabilité	faible: fausses alarmes	dépend des traitements subséquents	dépend des traitements subséquents	faible à bonne
Résistance mécanique	faible à bonne	faible à bonne	bonne	très bonne
Insensibilité aux variations atmosphériques	faible	faible	très élevée	bonne
Coût	faible à élevé	élevé	très élevé	très faible
Dimensions	faibles	faibles	élevées	faibles

Tableau 1.2: Capteurs pour la détection d'obstacles

	Détecteurs de proximité	Pare-chocs flexibles	Vision 2-D	Vision 3-D	Interrogeurs-répondeurs radios
Capteur actif/passif	passif et actif	passif	passif	actif et passif	actif
Avec/sans contact	sans	avec	sans	sans	sans
Mesure	présence	présence	luminosité	luminosité distance	présence
Principe de mesure	Effet de Hall magnétisme ...	contact mécanique	imagerie	imagerie, triangulation.	transmission d'ondes radio
Pleine échelle	portée: millimètres à centimètres	—	—	distance: dizaines de mètres	mètres à kilomètres
Précision et résolution	faible à très élevée	—	bonne à élevée	bonne à élevée	élevée
Fréquence d'acquisition	très élevée	élevée	faible à élevée	très faible à élevée	très élevée
Fiabilité	élevée	élevée	dépend des traitements subséquents	dépend des traitements subséquents	élevée
Résistance mécanique	très bonne	très bonne	bonne	faible à bonne	très bonne
Insensibilité aux variations atmosphériques	faible à élevée	très élevée	faible	faible	très élevée
Coût	très faible à élevé	très faible	faible	élevé à très élevé	élevé
Dimensions	faibles	très élevées	faibles	faibles à élevées	faibles

Tableau 1.3: Capteurs pour la détection d'obstacles

5. Systèmes de détection d'obstacles (SDO): état de l'art

De nombreux travaux dans le domaine industriel et au niveau de la recherche scientifique réfèrent à des systèmes de détection d'humains et d'obstacles. Dans cette section nous passons en revue l'état de l'art de ces systèmes, en les présentant selon la technologie des capteurs utilisés.

Pare-chocs flexibles

Les pare-chocs flexibles sont employés depuis plusieurs années sur les véhicules autoguidés servant dans l'industrie manufacturière, en particulier l'industrie automobile [Che85]. Ces véhicules [Mül83] [Mor87] sont utilisés pour le transport à basse vitesse (typiquement 0,5 m/s ou moins) de marchandises entre deux points de l'usine. La norme ANSI B 56.5 concerne l'utilisation sécuritaire des véhicules autoguidés manufacturiers et traite notamment des pare-chocs flexibles. Cette norme indique les signaux visuels et sonores destinés à identifier l'état de fonctionnement du véhicule pour les humains.

Différentes formes de pare-chocs flexibles sont disponibles: les pare-chocs flexibles en jupe avec détecteurs de proximité et ceux en mousse à fibre optique [Tra87]. Leur fiabilité est élevée puisqu'ils sont auto-vérifiables. Cependant l'emploi des pare-chocs flexibles dépend de la géométrie du véhicule et leur utilité est limitée à des véhicules se déplaçant à basse vitesse.

Détecteurs de proximité

Les détecteurs de proximité sont utilisés dans la recherche en robotique mobile pour la détection d'obstacles et d'humains. Le robot mobile Robart II [EG88], développé pour la surveillance de bases militaires, utilise un détecteur de proximité optique conventionnel pour détecter les obstacles à quelques centimètres du sol et à infrarouge pour les obstacles éloignés (jusqu'à 15 mètres).

En multipliant le nombre de détecteurs de proximité, il est possible de créer des systèmes mesurant des distances selon le principe de triangulation. H.R. Everett et J.M. Moser [ME89] ainsi que J.A. Marszalec [MK92] poursuivent des travaux de recherche sur le développement de capteurs optiques utilisant ce principe. Des études approfondies du rapport signal-bruit, et en particulier de l'effet de l'éclairage ambiant, sont nécessaires pour déterminer les différentes caractéristiques de ces capteurs. A.M. Flynn et H.E.M. Viggs [FV88] effectuent des recherches sur un détecteur d'humains par infrarouges pour le robot mobile Seymour du MIT (Massachusetts Institute of Technology). Le robot doit pouvoir détecter, localiser et suivre des humains dans un environnement contrôlé, à l'aide de huit détecteurs pyroélectriques. Afin que le robot détecte et localise continuellement les humains, il doit y avoir un mouvement

constant entre les détecteurs et l'humain pour créer des variations de température (détection dans un rayon de près de 6 m autour du robot).

Systèmes de balises radiofréquences

Les systèmes de balises radiofréquences (RF) servent généralement à la gestion automatisée des stocks, à la sécurité de bâtiments ou au repérage à distance d'objets ou d'espèces animales. Par exemple, les systèmes de gestion automatisée des stocks emploient ces balises pour identifier et compter des marchandises. A notre connaissance, ces balises ne sont pas utilisées pour les véhicules automatisés. Cependant un humain, porteur de ce type de balise, pourrait être détecté facilement par un véhicule automatique dans une mine souterraine.

Vision 2-D

Un système de vision 2-D omnidirectionnel permettant à un robot mobile d'éviter les obstacles fixes et en mouvement rectiligne a été développé au Japon [YKT91]. Le système optique est baptisé COPIS (CONic Projection Image Sensor). Il est composé d'une caméra et d'un miroir conique suspendu au-dessus de la caméra permettant de visualiser 360° autour du robot. Étant donné les traitements nécessaires pour l'analyse d'image, le robot mobile utilisant COPIS est limité à une vitesse de 5 cm/s.

Télémètres à laser

De nombreux travaux de recherche pour la détection et l'évitement d'obstacles utilisent les données provenant de télémètres à laser: ces données sont obtenues par balayage sous forme d'un plan ou d'une image 3-D d'une zone à l'avant du véhicule.

Une étude importante de ces problèmes a été réalisée par S. Singh et P. Keller [SK91]. Dans une première phase, le télémètre à laser est utilisé pour balayer un plan parallèle à la surface de roulement à l'avant du véhicule. Le véhicule est alors capable de circuler sur route à 6 m/s et de freiner à temps lors de la détection d'un obstacle. Les résultats obtenus, au niveau de la détection, sont cependant limités. Les obstacles de faible taille, au-dessous du plan balayé, ne sont pas détectés et lorsque le véhicule est en tangage, le sol peut être perçu comme un obstacle (fausses alarmes). Dans une seconde série d'expériences, le laser télémétrique balaye un espace à trois dimensions de la forme d'un cône, à l'avant du véhicule, et orienté obliquement vers le sol. Les données sur tout cet espace doivent alors être traitées pour discerner les obstacles dans la scène. Le volume de données à analyser est alors très important.

Dans le cadre des projets de la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) aux États-Unis, différents travaux basés sur l'utilisation d'un laser télémétrique conçu au ERIM (Environmental Research Institute of Michigan) ont été réalisés. Ces travaux visent la mise au point de véhicules autonomes capables de circuler sur route et hors route. Le laser ERIM fournit des images de 64 x 256 pixels de

profondeur à une fréquence de 2Hz, une portée de 20 m (80° d'azimut et 30° d'élévation) et une résolution de l'ordre de 7,8 cm. M. Hebert étudie les problèmes de navigation pour un véhicule autonome hors route. R.T. Dunlay et G. Morgenthaler [DM86] [Dun88] travaillent à la mise au point d'un véhicule autonome capable de suivre une route pavée.

Un laser télémétrique à deux faisceaux est utilisé pour le robot mobile autonome MACROBE à l'Université Technique de Munich en Allemagne [FFS91], [FKS90]. En Europe, dans le cadre du projet PROMETHEUS (PROgram for a European Traffic), [TSR90], un télémètre à laser sans pièces mobiles est développé pour réaliser un système de détection et d'évitement d'obstacles pour des véhicules automobiles. Pour le robot mobile Blanche [Cox91] de AT&T ainsi que pour le robot décrit dans [EHSK99], un capteur télémétrique à laser est utilisé à la fois pour détecter les obstacles et pour le guidage.

Des télémètres à laser sont également en développement pour la navigation de robots mobiles: le laser télémétrique de Flir Systems [Ker88], le laser Perceptron et le laser télémétrique 2-D fabriqué par IBEO.

Radar

Les recherches sur l'utilisation de radars pour la détection d'obstacles sont concentrées sur l'augmentation de la sécurité des véhicules automobiles. Elles portent sur trois points:

1. Signal de prévention au conducteur lorsqu'un obstacle est détecté et qu'il peut être évité;
2. Application automatique des freins lorsqu'une collision inévitable est détectée;
3. Suivi en file automatisée, à distance constante, de véhicules.

Un article de D.M. Grimes et T.O. Jones [GJ74] fait une introduction pertinente aux radars de détection d'obstacles pour des automobiles. Les radars ont l'avantage de pouvoir fonctionner dans la plupart des conditions atmosphériques (pluie, brouillard, neige). Cependant les paramètres de conception du radar comme la fréquence d'opération, le type de modulation et le patron de radiation doivent être choisis en fonction des performances désirées. Pour les véhicules automobiles, la région à couvrir doit augmenter avec la vitesse, ce qui entraîne la perception d'objets hors voie comme des obstacles, d'où le risque de fausses alarmes. Les études menées aux laboratoires RCA sur ces radars sont présentées dans [B*79] et [Bel82]. On trouve dans [Man87] un radar d'anticollision pour véhicules lourds qui fut le premier du genre à être accepté par le FCC (Federal Commission of Communication) des États-Unis en septembre 1985. Un état de l'art [INR89] a récemment été publié par l'INRETS (Institut National de Recherches sur les Transports et leur Sécurité de France) sur les radars d'anticollision pour véhicules automobiles. Cet ouvrage est complet et récent, 110 articles et produits commerciaux y ont été analysés et évalués.

Sonars

Les sonars sont très populaires dans le domaine de la robotique mobile pour la détection d'obstacles. Les ondes ultrasoniques sont lentes et sensibles aux conditions de température et d'humidité. La résolution angulaire des sonars est faible et des réflexions spéculaires peuvent fausser les mesures. Leur popularité s'explique par leur coût peu élevé. Généralement les sonars sont disposés sous forme d'un anneau comprenant au moins 12 unités et ont pour fonction de détecter la présence d'obstacles dans l'environnement du robot. J. Borenstein et Y. Koren [BK91] ont développé une méthode appelée "Vector Field Histogram" (VFH) permettant à un robot mobile de détecter et d'éviter les obstacles tout en naviguant vers une cible prédéterminée. La détection des obstacles est accomplie par 24 sonars Polaroid [Pol91] disposés en anneau à 15° d'écart. Une autre méthode développée par A. Elfes [Elf89] [ME85] se base sur une analyse de probabilités pour déterminer les régions de l'espace occupées par des obstacles. L'environnement de navigation du robot est discrétisé en cellules rectangulaires. Chaque cellule est marquée d'un indice de confiance sur la probabilité d'occupation par un obstacle. Cette méthode est adaptée à l'utilisation de capteurs ayant certaines incertitudes tel que les capteurs ultrasoniques. A. Elfes travaille actuellement [Elf92] à augmenter les facultés de perception des robots en augmentant et en diversifiant la nature des indices associés à chaque cellule. Le traitement des mesures obtenues par un anneau de sonars est également étudié dans [Wal87] [LKW89]. Les robots Hermies-III [R*91], Helpmate [KBKS88], le CMU Rover [Mor83], Hilare [B*81], Allen [FB88] et d'autres [RL86] [Dru88] utilisent des sonars pour détecter la présence d'obstacles.

Vision 3-D

Vision par lumière structurée

Le Sandia National Laboratories [EGDM88] [CDT91] utilise un système de vision par lumière structurée embarqué sur un robot mobile pour la détection et l'évitement d'obstacles. Le robot mobile doit être utilisé dans les situations d'urgence à l'intérieur des centrales nucléaires. Trois lasers hélium-néon de 5mW combinés avec un système optique permettent de projeter une ligne horizontale de puissance suffisante, à environ 2 m à l'avant du robot sur le plan de navigation.

D'autres systèmes de vision par lumière structurée sont étudiés, notamment à Carnegie-Mellon University [KGC91]. Le Centre National de Recherche du Canada a développé le capteur BIRIS en utilisant également ce principe [BRD91].

Vision dynamique

Un système de vision dynamique monoculaire présenté dans [DG88b] et [DG88a] pour le suivi de route et la détection d'obstacles a été mis au point en Allemagne par V. Graefe et E.D. Dickmanns. La technique développée est complexe et nécessite l'utilisation de processeurs spécialisés. Une vitesse de 96 Km/h sur un chemin sans obstacles a été atteinte avec ce système. Les obstacles peuvent également être identi-

fiés en recherchant dans l'image toute inégalité d'intensité lumineuse sur la chaussée [Gra90].

Vision binoculaire

Un système de navigation et de détection d'obstacles basé sur la vision binoculaire et implanté sur des processeurs performants a été mis au point à la General Dynamics Land Systems Division [Kay89]. Avec une méthode locale (analyse de parties de l'image) de mise en correspondance [KE88], une image 3-D est formée par fusion de 2 images de 256 x 256 pixels (intensité codée sur 8 bits) en une seconde. Au Japon, un système de vision binoculaire intégré a été développé [TMS91]. Deux images dirigées par des miroirs et passées à travers des masques sont superposées sur une même image et analysées pour obtenir une image 3-D.

6. Étude expérimentale des capteurs en milieu minier

Objectif

Cette étude a été réalisée au Centre de Technologie Noranda en collaboration avec la Division Mines Gaspé de Noranda. L'objectif était d'élaborer un système d'assistance à l'opérateur d'un véhicule d'intervention d'urgence. Ce véhicule est utilisé lors d'un incendie dans la mine souterraine Gaspé à Murdochville pour l'évacuation du personnel. Dans ces circonstances, la conduite du véhicule d'intervention est rendue très difficile par la présence d'une fumée dense dans les galeries. En plus de conduire le véhicule à tâtons, les secouristes deviennent confus quant à leur position dans la mine. Le but du projet est de concevoir un système de guidage d'appoint permettant au conducteur de:

- se diriger et d'éviter les obstacles éventuels à l'aide d'un dispositif lui permettant de visualiser sur un écran le chemin à l'avant du véhicule, tel qu'il apparaîtrait grossièrement sans fumée,
- connaître sa position dans le réseau de galeries souterraines.

Deux types d'obstacles (mis part les parois des galeries) peuvent être rencontrés: un véhicule abandonné bloquant le chemin ou un humain debout, accroupi ou couché sur la voie. Des pièces d'équipements peuvent obstruer partiellement ou complètement le chemin mais cette éventualité est plutôt faible. Le conducteur doit être prévenu assez tôt pour éviter ces obstacles et aucune collision ne doit se produire.

Conditions atmosphériques de fonctionnement

Les matériaux de combustion en cause lors d'incendie dans les mines sont principalement le caoutchouc (pneus des véhicules, fils électriques, etc.) et le diesel qui alimente tous les moteurs employés. Selon [Gri79], la fumée comprend des particules dont les

dimensions vont de 0,01 à 10 microns. La dimension de ces particules de fumée limite le choix des capteurs pour la détection d'obstacles à cause des phénomènes d'absorption et de diffusion des ondes. Pour ne pas subir d'extinction, une onde qui voyage dans une fumée de particules de diamètre d doit avoir une longueur d'onde λ telle que:

$$\frac{\lambda}{d} \gg 1 \quad (1.1)$$

Plus la longueur d'onde employée par le capteur sera grande, meilleure sera sa transmission à travers la fumée. Ceci élimine donc directement tous les systèmes opérant dans le visible et dans l'infrarouge proche. Les capteurs qui offrent un potentiel pour le système de guidage d'appoint sont alors les sonars, les radars, les caméras infrarouges dans la bande 8 à 12 microns et les systèmes de balises radiofréquences. Chacun de ces capteurs a été étudié et testé dans une mine souterraine.

Présentation des capteurs et résultats des expérimentations dans une mine souterraine

Les expérimentations se sont tenues les 23 et 24 avril 1992 à la mine souterraine Gaspé à Murdochville au niveau 1700. Les expériences consistaient à collecter les mesures prises par les différents capteurs et à déterminer si cette information était de bonne qualité.

Sonars

Les sonars de la compagnie Milltronics furent utilisés pour ces tests. Il s'agit de sonars de construction robuste qui fonctionnent à une fréquence de 41,5 KHz, avec un angle d'émission de 12°. Les distances mesurées vont de 0,40m à 3,90m à une fréquence de 20Hz.

Un première expérience a permis de déterminer l'angle maximal de réflexion sur les parois des galeries minières. Sur une surface lisse, cet angle maximal est de 12°. Sur les parois des galeries minières qui sont des surfaces diffuses, l'angle maximal de réflexion mesuré est de 40°, en moyenne. Si le véhicule est à 2 mètres du mur, le sonar ne peut prendre de mesure sur le coté à plus de 1,7 mètres à l'avant. Cet angle de réflexion maximal est donc très limitatif puisqu'il restreint la portée des sonars à l'avant du véhicule.

La seconde expérience consistait à qualifier les mesures obtenues à l'aide du sonar dans les mines souterraines. Les observations suivantes sont ressorties:

- La répétabilité des mesures est faible;
- Le risque de fausses mesures est toujours présent puisqu'il n'est pas toujours possible d'aligner le sonar avec le mur (trous, bosses, etc.);
- Les mesures du sonar sont trop lentes et trop peu fiables pour le système de guidage d'appoint.

La conclusion des expérimentations avec les sonars est la suivante:

“Les sonars ne peuvent servir à guider un conducteur à travers la fumée. Leur seule utilité est de déterminer s’il y a un objet à une distance prédéterminée à l’avant du véhicule.”

Radar

Nous n’avons pu disposer d’un radar à courte portée pour les expérimentations. Nous avons alors utilisé un laser télémétrique ou lidar. Les lidars et les radars fournissent essentiellement le même type de mesures. Les deux capteurs balayent un plan et donnent une suite de mesures sous la forme d’un couple de coordonnées polaires (angle, distance). Cependant la résolution angulaire du lidar est supérieure à celle du radar. De plus le radar fonctionne en présence de fumée tandis que le lidar ne fonctionne pas dans ce cas.

Les expérimentations à la mine ont pour but de déterminer si le type de mesures obtenues à l’aide d’un radar ou d’un lidar permet à un opérateur de conduire un véhicule à travers la fumée (avec une visibilité pratiquement nulle). Le lidar employé est fabriqué par la compagnie IBEO. Ce lidar a une portée minimale de 1 mètre et maximale de 20 mètres. Une mesure est prise à chaque intervalle de $0,6^\circ$ sur un arc de 180° . La précision de la distance est de l’ordre de 10 centimètres et la précision sur l’angle de $0,01^\circ$. Un arc de cercle de 180° est balayé en $1/8$ de seconde. Lors des expérimentations, un conducteur habitué au lidar réussit à rouler à 5 Km/h. Cette performance serait aisément dépassée si les mesures étaient présentées sous une forme plus facile à interpréter. Les observations suivantes ont été faites:

- Les mesures du lidar sont précises et rapides;
- La présentation des mesures au conducteur devrait être améliorée ;
- Les obstacles au sol ne sont pas détectés puisque le lidar balaye un plan au-dessus du capot du véhicule. Ainsi, lors des expérimentations, le véhicule a buté sur une roche que le lidar n’avait pas indiqué;
- Le champ de mesure devrait pouvoir être augmenté ou diminué par l’usager pour visualiser une intersection ou négocier un passage serré.

La conclusion des expériences est donc:

“Il est possible de conduire un véhicule à travers la fumée avec des mesures de distance. Les mesures obtenues doivent être présentées sous une forme facile à interpréter. Un mécanisme doit permettre de détecter les obstacles au sol.”

Caméra infrarouge

Une caméra infrarouge Thermovision 210 de la compagnie AGEMA a servi pour les expérimentations. Cette caméra opère dans la bande de 3 à 5 microns. Cette

caméra permet d'observer des températures allant de -20°C à 800°C avec une sensibilité de $0,1^{\circ}\text{C}$. La caméra infrarouge Thermovision 210 a été évaluée dans les galeries minières souterraines. Un humain, un véhicule ou tout autre source de chaleur sont visibles dans une galerie minière. Cependant, lorsqu'aucune source de contraste thermique (objet plus chaud ou plus froid) n'est présente, l'image est complètement uniforme et on ne distingue rien. L'information captée par ce type de caméra n'est pas très fiable et ne permet donc pas de conduire le véhicule dans la mine.

Système de balises radiofréquences

Le système de balises radiofréquences (RF) employé pour les expérimentations est fabriqué par la compagnie LOTEK Engineering. Ce système est constitué d'un récepteur passif SRX-400 et de balises qui émettent un code autour de 150MHz à intervalles réguliers. Le récepteur indique sur un écran la puissance du signal reçu, ce qui donne une indication de la distance de la balise.

Les expériences dans la mine souterraine avec le système de balises radiofréquences se sont concentrées sur le problème de détection et de localisation d'un humain portant une de ces balises. Le signal RF de ces balises se propage bien dans les galeries minières souterraines et à travers le corps humain. Une personne couchée sur une balise, cachée derrière un bloc de béton, a été localisée en quelques minutes en partant d'une distance de plus de cinquante mètres et en franchissant plusieurs intersections. La conclusion des expériences avec le système de balises RF est:

"Les systèmes de balises RF dont les fréquences traversent le corps humain et se propagent bien dans les galeries minières souterraines permettent de détecter, d'identifier et de localiser efficacement une personne ou un objet portant une balise dans une mine souterraine."

Ces systèmes sont donc fortement recommandés pour la recherche de personnes à secourir et pour l'identification de points de repères pour le système de guidage d'appoint. Notons qu'une étude portant sur l'emploi de balises RF dans les mines souterraines est présentée dans [WCPB84].

7. Conclusion et recommandations

Problématique

Les véhicules miniers de transport de minerai sont l'objet de nombreuses études en vue de leur automatisation. Étant donné l'encombrement de ces véhicules et les conditions environnementales que l'on retrouve dans les mines, le développement de systèmes de détection d'humains, d'obstacles et d'anti-collision est un problème important qui doit être abordé à deux niveaux:

- au niveau du véhicule, par le développement et l'utilisation de capteurs pour la détection d'humains et d'obstacles. Les spécifications de ces détecteurs sont reliées aux notions d'espace d'anticipation et de zone de visibilité pour les véhicules.

- au niveau de l'organisation des opérations minières. Les véhicules automatisés doivent opérer dans des zones dont l'accès est strictement contrôlé et supervisé (ZOA zone d'opération automatisée) . Dans les mines souterraines ces zones peuvent être limitées de façon stricte à des secteurs précis. Dans une mine à ciel ouvert, cette zone couvre presque la mine au complet.

Étant donné la diversité de conditions que l'on retrouve dans les mines, des études plus détaillées devront être réalisées sur des cas typiques pour définir les problèmes de détection d'humains et d'obstacles et proposer des solutions pratiques.

État de l'art: les capteurs et les systèmes de détection d'humains et d'obstacles

Au niveau technique, la détection d'humains et d'obstacles est une activité sensorielle basée sur des mesures physiques prises par des capteurs. Deux types de systèmes de détection sont à distinguer:

- les systèmes de *détection directe* qui utilisent l'information d'un capteur pour déterminer la présence d'un obstacle. Les pare-chocs flexibles, les détecteurs de proximité, les balises radio-fréquences entrent dans cette catégorie.
- les systèmes de *détection par modélisation et perception* qui réalisent des traitements sur l'information provenant des capteurs et qui ont la capacité de discerner dans la scène les humains et les obstacles. Ces systèmes doivent manipuler un grand volume de données généralement multidimensionnelles. Les imageurs 3-D par exemple entrent dans cette catégorie.

L'état de l'art révèle qu'à l'heure actuelle, seuls les systèmes de détection directe sont utilisés au niveau industriel. Les performances de ces détecteurs sont cependant limitées à la propriété physique mesurée par le capteur. Par exemple, les pare-chocs flexibles informent de la présence d'un obstacles au moment du contact physique avec le véhicule et pour un seuil de force déterminé.

Une grande activité de recherche est actuellement en cours dans ce domaine. Au niveau des systèmes de détection directe, des capteurs sans contact comme les différents capteurs de proximité (optiques, pyroélectriques et infrarouges) ainsi que certains capteurs radars sont en développement ou au stade de prototype. Les caractéristiques de ces nouveaux capteurs devront être analysées pour évaluer leur performance et leur fiabilité. De façon plus spécifique, les balises radiofréquences offrent à court terme un potentiel intéressant pour la détection d'humains, notamment dans les mines souterraines.

Au niveau des systèmes de détection par modélisation et perception, l'activité de recherche couvre à la fois la conception de capteurs et le traitement de données. Dans ce domaine, la majorité des capteurs sont du type multidimensionnel, c'est-à-dire qu'ils mesurent plusieurs caractéristiques physiques. Par exemple les imageurs 3-D du type laser, vision stéréo ou radar donnent une mesure de distance des objets en coordonnées polaires à partir d'un point d'observation. Essentiellement ces capteurs

cherchent à imiter et reproduire le système de perception visuel humain. L'objectif des traitements de données est alors de discerner les objets (éventuellement les obstacles) dans la scène. Ces traitements ont un niveau de complexité important. La grande majorité des travaux dans ce domaine sont au stade de la recherche en laboratoire et du prototype de démonstration. Pour analyser et évaluer les performances et la fiabilité de ces systèmes, il faudrait analyser tous les sous-systèmes et toutes les étapes de traitement à partir du capteur jusqu'au traitement final. Ces données ne sont pas disponibles dans la littérature. La plupart du temps, les performances réelles de ces systèmes n'ont pas été évaluées selon un protocole scientifique rigoureux: les résultats ne peuvent souvent pas être reproduits et vérifiés de façon indépendante parce que les capteurs ne sont pas commercialement disponibles et les montages informatiques ne sont pas toujours transférables.

Evaluation expérimentale

Une évaluation expérimentale de différents capteurs pour la détection d'humains et d'obstacles a été réalisée à la mine souterraine Gaspé à Murdochville. Cette évaluation a été réalisée dans le cadre de l'étude d'un véhicule d'intervention opérant en cas d'incendie dans la mine. Les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Les conditions d'opérations sont très critiques dans le choix de la technologie des capteurs. Dans cette étude, le système doit opérer dans les conditions de fumée d'incendie et le choix des capteurs est limité aux technologies suivantes: les sonars, les radars et les balises radiofréquences.
- les sonars possèdent deux limitations importantes: mauvaise fiabilité de mesures à cause des phénomènes de diffusion et lenteur des mesures pour un véhicule en mouvement. Les sonars peuvent servir de détecteur de présence d'obstacles à l'avant du véhicule; leur fiabilité est à analyser en fonction du type d'obstacles prévisibles.
- les balises radiofréquences ont été testées avec succès pour la détection d'humains dans un réseau de galeries à l'intérieur d'une mine souterraine. Au niveau du récepteur, la puissance du signal permettrait d'évaluer la distance entre le récepteur et le porteur de la balise.
- les données télémétriques sous forme d'un plan de mesure à l'avant du véhicule, obtenues à partir d'un télémètre (radar ou laser), sont insuffisantes pour guider manuellement un véhicule et détecter les obstacles dans une galerie minière. Il faut recourir à un imageur 3-D. Dans ce cas le volume de données à traiter est beaucoup plus important.

Recommandations

Dans le domaine des mines, les travaux de développement et de recherche sur les systèmes de détection d'humains, d'obstacles et d'anti-collision devraient prendre les

orientations suivantes:

À court terme dans les mines souterraines,

- La détection d'humains peut être réalisée en s'assurant que chaque personne porte une balise radiofréquence. Des études devraient analyser en détail les performances de ces balises et étudier leur implantation.
- Les systèmes de sécurité doivent être situés soit à bord du véhicule automatisé, soit au niveau de la zone d'opération automatique (ZOA), soit répartis entre ces deux niveaux. Des études de cas, en collaboration avec les exploitants miniers, sont nécessaires pour définir les objectifs des systèmes de sécurité à chaque niveau. Il est clair que l'accès à la ZOA doit être contrôlé de façon très stricte. Le développement de systèmes de détection directe d'obstacles devrait être une priorité pour les véhicules miniers souterrains.
- Pour les camions souterrains, il est possible de développer des systèmes de détection directe d'obstacles pour l'avant et l'arrière du véhicule. Ces capteurs pourraient surveiller la surface de roulement par vision artificielle en utilisant un éclairage structuré. Dans le cas d'un chargeur-transporteur, la présence du godet limite fortement les possibilités de détection.

À court terme dans les mines à ciel ouvert,

- Pour les mines à ciel ouvert, la zone d'exploitation automatisée couvre pratiquement toute la mine. La gestion des équipements opérant dans toute la mine doit être envisagée comme une extension du système de répartition actuellement utilisé.
- Pour les camions super-lourds, les systèmes de détection directe d'obstacles utilisant des radars offrent le meilleur potentiel de fonctionnement pour les conditions environnementales présentes (gouttelles d'eau, poussière, soleil, pluie, brouillard, neige). Les prototypes en développement pour les automobiles et les camions devraient être testés sur les véhicules miniers et éventuellement des travaux de recherche portant sur le développement de détecteurs radar pour ces véhicules devraient être entrepris.

À long terme

- À plus long terme, les systèmes de détection par modélisation et perception offrent un potentiel intéressant pour l'application dans les mines. Pour évaluer et comparer ces systèmes, des problèmes ou des scénarios typiques pourraient être proposés aux chercheurs de manière à susciter des développements et donner une base de comparaison pour les capteurs et les systèmes de traitement de données.

Bibliographie

- [B*79] E. Belohoubek et al. "Radar-Controlled Functions in the U.S. Research Safety Vehicles". *Proceedings on Experimental Safety Vehicles*, 1979.
- [B*81] B. Bauzil et al. "A Navigation Sub-System using Ultrasonic Sensors for the Mobile Robot HILARE". *First International Conference on Robot Vision and Sensory Control*, April 1981.
- [Bel82] E. Belohoubek. "Radar Control for Automotive Collision Mitigation and Headway Spacing". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, VT-31(2), May 1982.
- [BK91] J. Borenstein et Y. Koren. "The Vector Field Histogram: Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(3), June 1991.
- [BRD91] F. Blais, M. Rioux, et J. Domey. "Optical Range Image Acquisition for the Navigation of a Mobile Robot". *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1991.
- [CDT91] B. Christensen, W. Drotning, et S. Thunborg. "Model Based, Sensor Directed Remediation of Underground Storage Tanks". *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 1991.
- [Che85] K. Cheshire. "Some Safety Aspects of AGVS". *Third International Conference on Automated Guided Vehicule Systems*, October 1985.
- [Cox91] I.J. Cox. "Blanche - An Experiment in Guidance and Navigation of an Autonomous Robot Vehicle". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(2), April 1991.
- [DG88a] E.D. Dickmanns et V. Graefe. "Applications of Dynamic Monocular Machine Vision". *Machine Vision and Applications*, 1988.
- [DG88b] E.D. Dickmanns et V. Graefe. "Dynamic Monocular Machine Vision". *Machine Vision and Applications*, 1988.

- [DM86] R.T. Dunlay et G. Morgenthaler. "Obstacle Avoidance on Roadways using Range Data". *SPIE on Mobile Robots*, 727, 1986.
- [Doe90] E.O. Doebelin. "Measurement Systems Application and Design.". McGraw-Hill Company, 1990.
- [Dru88] G. Drunk. "Sensors for Mobile Robots". *NATO ASI Series: Sensors and Sensory Systems for Advanced Robots*, 1988.
- [Dun88] R.T. Dunlay. "Obstacle Avoidance Perception Processing for the Autonomous Land Vehicle". *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 1988.
- [EG88] H.R. Everett et G.A. Gilbreath. "A Supervised Autonomous Security Robot". *Robotics and Autonomous Systems*, 4(3), November 1988.
- [EGDM88] T.J. Essenmacher, V.G. Grafe, G.S. Davidson, et M.M. Moya. "A Structured Lighting Vision System for Dynamic Obstacle Avoidance with a Mobile Robot". *SPIE Mobile Robots III*, November 1988.
- [EHSK99] H. Eisenreich, A. Herzog, F. Sinn, et H.P. Kugler. "Combined Navigation and Anti-collision Sensor for Transport Robots". *Sensors and Actuators A*, 20, 1899.
- [Elf89] A. Elfes. "Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation". *IEEE Computer Society*, 1989.
- [Elf92] A. Elfes. "Dynamic Control of Robot Perception Using Multi-Property Inference Grids". *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1992.
- [FB88] A.M. Flynn et R.A. Brooks. "MIT Mobile Robot: What's next?". *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 1988.
- [FFS91] C. Fröhlich, F. Freyberger, et G. Schmidt. "A Three-Dimensional Laser Range Camera for Sensing the Environnement of a Mobile Robot". *Sensors and Actuators A*, 1991.
- [FKS90] F. Freyberger, P. Kampmann, et G.K. Schmidt. "Constructing Maps for Indoor Navigation of a Mobile Robot by using an Active 3D Range Imaging Device". *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, 1990.
- [FV88] A.M. Flynn et H.E.M. Viggs. "Infrared People Sensors for Mobile Robots". *SPIE on Mobile Robots III*, November 1988.

- [GJ74] D.M. Grimes et T.O. Jones. "Automotive Radar: A brief review". *Proceedings of the IEEE*, 62(6), June 1974.
- [Gra90] V. Graefe. "An Approach to Obstacle Recognition for Autonomous Mobile Robots". *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, 1990.
- [Gri79] R.E. Griffin. "In-Mine Evaluation of Underground Fire and Smoke Detectors". *U.S. Bureau of Mines Circular 8808*, 1979.
- [Har80] L.D. Harmon. "Touch Sensing Technology - A Review". Rapport technique, Technical Report MSR80-03 Society of Manufacturing Engineers, 1980.
- [INR89] INRETS. "V1002 - Smiler Project Short Range Microwave Links for European Roads: Present and Future.". Rapport technique, Institut National de Recherche en Transport et Sécurité, 1989.
- [Kay89] A.E. Kayaalp. "High Speed Machine Perception using Passive Sensing Technology". *SPIE Mobile Robots IV*, 1989.
- [KBKS88] B. Krishnamurthy, B. Barrows, S. King, et T. Skewis. "Helpmate: A Mobile Robot for Transport Applications. *SPIE Mobile Robots III*, 1007, 1988.
- [KE88] A.E. Kayaalp et J.L. Eckman. "A Pipeline Architecture for Near Real-Time Stereo Range Detection". *SPIE Mobile Robots III*, 1988.
- [Ker88] J.R. Kerr. "Real Time Imaging Rangefinder for Autonomous Land Vehicle". *SPIE on Mobile Robots III*, November 1988.
- [KGC91] T. Kanade, A. Gruss, et R. Carley. "A Very Fast VLSI Rangefinder". *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 1991.
- [LKW89] S.Y.T. Lang, L.W. Korba, et A.K.C. Wong. "Characterization and modelling a Sonar Ring". *SPIE on Mobile Robots IV*, November 1989.
- [Man87] B.E. Manz. "A Parabolic Dish for Every Bumper". *Microwaves and RF*, November 1987.
- [ME85] H.P. Moravec et A. Elfes. "High Resolution Maps from Wide Angle Sonar". *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, March 1985.
- [ME89] J.M. Moser et H.R. Everett. "Wide-Angle Optical Ranging System". *SPIE on Mobile Robots IV*, 1195, 1989.

- [MK92] J.A. Marszalec et H.M. Keranen. "A Photoelectric Range Scanner Using an Array of LED Chips". *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1992.
- [Mor83] H. Moravec. "The Stanford Cart and the CMU Rover". *Proceedings of the IEEE*, 71(7), July 1983.
- [Mor87] J. Mortimer. "Are AGVs Set to Follow the Robotics Growth Path ?". *The Industrial Robot*, 1987.
- [Mül83] T. Müller. *"Automated Guided Vehicles"*. Springer-Verlag, 1983.
- [Pol91] Polaroid. *"Capteurs ultrasoniques"*. Polaroid Corporation Ultrasonic Components Group, Cambridge MA U.S.A., 1991.
- [R*91] D.B. Reister et al. "Demo 89 - The Initial Experiment with the Hermies-III Robot". *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 1991.
- [RL86] U. Rembold et P. Levi. "Sensors and Control for Autonomous Robots". *Proceedings Intelligent Autonomous Systems*, December 1986.
- [SK91] S. Singh et P. Keller. "Obstacle Detection for High Speed Autonomous Navigation". *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 1991.
- [TMS91] J. Takeno, N. Mizuguchi, et K. Sorimati. "Realization of a 3D Vision Mobile Robot that can Avoid Collision with Moving Obstacles". *IEEE on Robotics and Automation*, April 1991.
- [Tra87] P.M. Tracey. "AGV System Safety: Current Developments". *Fifth International Conference on Automated Guided Vehicle Systems*, October 1987.
- [TSR90] T. Tiedeke, P. Schnadel, et E. Rille. "Vehicle Distance Sensor using a Segmented IR Laser Beam". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1990.
- [Wal87] S.A. Walter. "The Sonar Ring: Obstacle Detection for a Mobile Robot". *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, March 1987.
- [WCPB84] W. Webb, R. Church, W. Pittman, et J. Boyle. "A Short Range Locator System for Detecting Trapped Miners". *U.S. Bureau of Mines Circular 8844*, 1984.

- [YKT91] Y. Yagi, S. Kawato, et S. Tsuji. "Collision Avoidance Using Omnidirectional Image Sensor (COPIS)". *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1991.

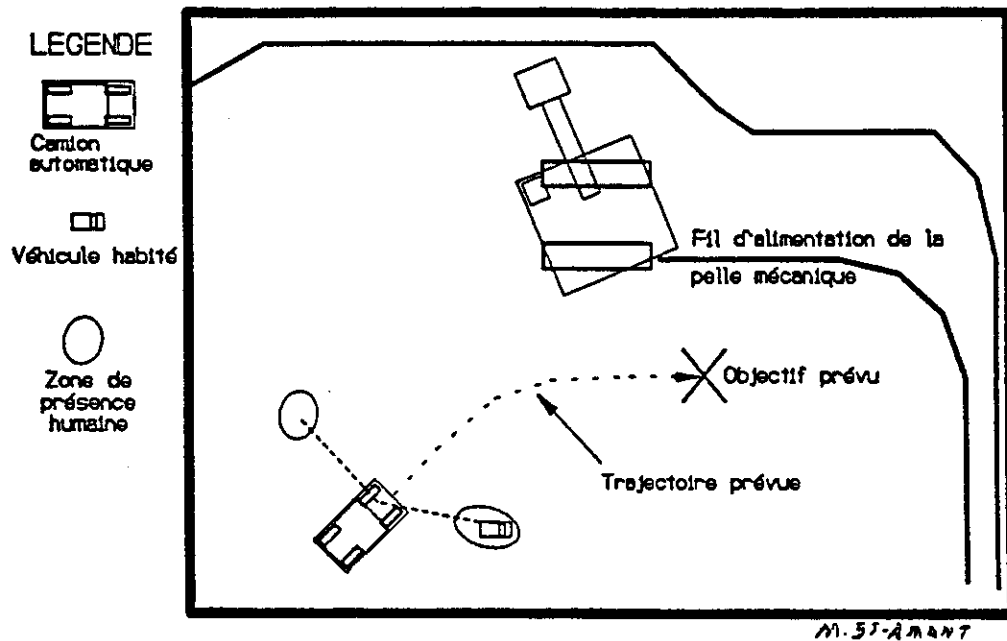


Figure 19: Exemple d'une représentation graphique sur écran cathodique des activités dans le voisinage d'un camion ayant détecté la présence d'humains.

- *Constatation*

Comme on peut s'en rendre compte, avec la technologie actuelle, on peut concevoir un système de sécurité robuste, acceptable et très flexible. Le problème est beaucoup plus sur le plan de l'analyse des besoins et des fonctions que sur le plan technique.

9 - CONCLUSION

Cette étude a permis d'élaborer et de mettre en valeur deux concepts spatiaux essentiels pour toute étude sur la sécurité du personnel impliquant des véhicules automatisés ou pour tout développement d'appareil anticollision: l'espace d'anticipation d'un véhicule et la zone d'opération automatique ou ZOA. L'espace d'anticipation a une structure comprend plusieurs zones, en particulier la zone "inévitabile". Ces zones sont constamment en évolution selon la vitesse et l'angle de braquage du véhicule. Tout détecteur d'humain pour fin d'anticollision doit, au minimum, couvrir la zone "inévitabile". La ZOA est un espace de sécurité nécessitant un niveau d'alerte plus élevé de la part des travailleurs, c'est une zone dangereuse. Malheureusement, il est difficile de la circonscrire car, dans les mines comme dans la plupart des chantiers, certaines de ses frontières sont dynamiques. Il y a alors risque de confusion.

Cette étude a aussi permis de mettre en relief: l'importance d'un système de communication bien adapté et la nécessité de bien comprendre le rôle des opérateurs de ces automates. Cette

Sécurité avec l'automatisation des mines

importance est reliée à la complexité et à la nature dynamique des concepts cités précédemment. Le système de communication permettra de réduire le risque de confusion.

Elle a aussi permis de prendre conscience que les tentatives de développer un système de détection automatique d'humains ne nécessitant aucune installation sur la personne n'aboutiraient qu'à des solutions dangereuses et instables. Ces systèmes ne seraient pas suffisamment fiables pour les fins de sécurité en chantier ou dans une mine. Ces systèmes auraient, par contre, des applications pour la surveillance policière et pour des fins militaires. La personne doit porter un transpondeur, soit une "étiquette" facilement reconnaissable et localisable par une machine.

Toute solution doit être évaluée à la lumière des connaissances de l'environnement physique et social des mines canadiennes. C'était le but de cette analyse de rassembler les informations pertinentes pour porter ensuite un jugement valable à toute solution technique proposée.

RÉFÉRENCE

J.J. Paques (1990), "Automation and Occupational Safety: Perspectives", Engineering Digest, June 1990, pp. 20-24.

Marcel St-Amant
Associé de recherche
CCARM, École Polytechnique
Ce Jeudi, 23 juillet, 1992.