

DÉTECTION DE PERSONNES PAR DES TECHNIQUES DE VISION NUMÉRIQUE : POSSIBILITÉS ET LIMITES

- Détection de personnes
- Vision numérique
- Zone à risque

► *Frédéric GARDEUX,*
INRS, département Ingénierie des équipements
de travail

DETECTION OF PERSONS BASED ON DIGITAL VISION: ADVANTAGES AND LIMITS

Presence detection based on electrosensitive devices concerns thousands of workplaces in France. It is not always possible to find a satisfactory solution for protecting danger zones such as loading areas of baling press conveyors at waste recycling plants or certain robotized zones. Today, many devices including light curtains, laser scanners or pressure sensitive mats can detect presence to ensure a high safety level in a danger zone. However, these devices are not always suitable because of their low discriminating capacity and their rigidity with respect to the protected area configuration. To overcome these limits and satisfy a broader application field, some protective equipment suppliers plan to introduce vision-based devices to protect danger zones. This paper analyses and discusses the capabilities of four image processing system designed to detect human presence in danger zones. A number of solutions have been identified.

- Detection of persons
- Digital vision
- Risk zone

La nécessité de détecter la présence de personnes dans des zones dangereuses concerne des milliers de postes de travail en France. Dans certaines situations, les préventeurs ne trouvent pas de solutions de protection satisfaisantes car les dispositifs existants, tels que les barrages immatériels ou les tapis sensibles à la pression, ne sont pas toujours adaptés du fait de leur pouvoir de discrimination limité, d'une part, et de leur manque de souplesse en matière de configuration de zones protégées, d'autre part. Pour dépasser ces limites et satisfaire un champ d'application plus large, des intégrateurs et des équipementiers envisagent le développement de dispositifs de détection de personnes basés sur la vision numérique. Cet article présente l'analyse de quatre principes de détection de personnes basés sur des techniques de vision. Des solutions pour détecter des personnes de façon sûre et robuste ont été identifiées.

Les dispositifs de détection électrosensibles de personnes permettent de limiter ou d'interdire toute présence humaine dans une zone reconnue comme dangereuse (éléments en mouvement d'un dispositif mécanisé, par exemple). L'objectif de ces dispositifs consiste à annihiler le phénomène dangereux (arrêt des parties mobiles d'une machine) si un homme venait à pénétrer dans une telle zone. Les dispositifs de détection de présence contribuent donc à ce que l'homme puisse évoluer en sécurité dans une zone protégée. On recense aujourd'hui de nombreux dispositifs tels que les barrages immatériels, les systèmes à balayage laser, les tapis sensibles à la pression, aptes à assurer, avec un haut niveau de sécurité, la détection d'une présence humaine dans une zone dangereuse. Toutefois, les préventeurs ne trouvent pas toujours de solutions de protection satisfaisantes pour de nombreuses situations de travail présentant un périmètre à protéger dans

lequel des personnes peuvent stationner comme, par exemple, les zones de chargement des tapis d'alimentation des presses à balles dans les usines de recyclage des déchets, certains îlots robotisés, ou encore des postes de travail où l'homme travaille en coactivité avec une machine. L'inadaptation des dispositifs électrosensibles actuellement disponibles sur le marché, pour ces situations de travail, vient du fait de leur faible pouvoir discriminant, d'une part, et de leur manque de souplesse en matière de configuration de zones protégées, d'autre part. Pour dépasser, ces limites et satisfaire un champ d'application plus large, des intégrateurs et des équipementiers envisagent de mettre en œuvre des systèmes basés sur la vision numérique pour assurer la fonction de détection de personnes dans des zones dangereuses [1]. Cet objectif est aujourd'hui envisageable du fait du niveau de maturité atteint par les techniques de vision.

En 2002, l'INRS a engagé une première étude visant à identifier les difficultés et les limites liées à la détection de personnes par vision. Il est apparu deux difficultés majeures. La première tient au fait qu'il est difficile d'identifier dans une image ou une séquence d'images, une ou plusieurs caractéristiques fiables permettant de détecter systématiquement la présence ou l'absence de l'entité à détecter, c'est-à-dire l'homme. Dans le champ du visible, l'homme n'émet pas de rayonnement spécifique ; aucune caractéristique visuelle permettant de le singulariser de l'environnement dans lequel il évolue n'a pu être identifiée. La seconde difficulté est liée à l'éclairage de la zone à protéger. Il n'est pas envisageable de maîtriser totalement les conditions d'éclairage de la zone à protéger [2, 3, 4]. L'éclairage, qu'il soit naturel ou artificiel, induit des ombres plus ou moins marquées variant avec l'angle d'incidence, ou encore des reflets sur les surfaces brillantes. Quand la scène est éclairée en lumière naturelle, on peut être confronté à de fortes variations d'intensité lumineuse. Ces phénomènes peuvent conduire soit à des détections parasites ne reflétant pas une présence réelle, soit à des manques de détection, c'est-à-dire des cas où une présence réelle n'est pas vue par le système. Une étude paramétrique a également permis de montrer que certaines caractéristiques de l'image comme la texture, la couleur étaient peu sensibles aux variations d'éclairage ambiant.

Suite à ces premiers constats, l'INRS a engagé une seconde étude pour analyser plus finement des voies de solutions robustes face aux perturbations environnementales d'un lieu de travail. Pour cela quatre approches ont été abordées : deux dans le domaine du visible, une dans le domaine du proche infrarouge et une dans le domaine de l'infrarouge lointain.

LES VOIES DE SOLUTION EXPLORÉES

DÉTECTION DANS LE DOMAINE DU VISIBLE

Comme l'objet de la détection (l'homme) ne possède pas de descripteurs permettant de le reconnaître sys-

tématiquement dans une image ou une séquence d'images, le principe consiste à introduire dans la scène un marqueur dont les caractéristiques sont parfaitement identifiables.

Deux approches sont alors possibles : marquer l'objet de la détection (l'homme) ou l'environnement dans lequel il évolue [5].

Disparition de contours d'une mire au sol

Le marquage de l'environnement est obtenu par texturation du sol de la zone à protéger. La détection repose alors sur la modification ou la disparition de propriétés visuelles locales (contours) du marqueur. La *Figure 1* illustre ce principe. Elle présente à gauche l'image

originale de la scène observée et à droite l'image des contours. On observe sur cette image que la présence d'une personne ou d'un objet produit des zones dans lesquelles les contours délimitant les éléments du marqueur ont disparu.

La mise en œuvre du principe de disparition de contours nécessite deux étapes. Une première étape, à la mise en service du dispositif, consiste à réaliser une image de référence. Elle enregistre la position des contours dans une zone exempte de toute intrusion. En exploitation, l'image des contours est comparée à l'image de référence. Les contours disparus sont signalés. Si, dans un voisinage donné, le nombre de contours disparus est supérieur à un niveau de seuil donné, un signal indiquant une

FIGURE 1

Principe de la détection de disparition de contours liés à une mire au sol
Detection principle based on disappearance of outlines associated with a floor test pattern

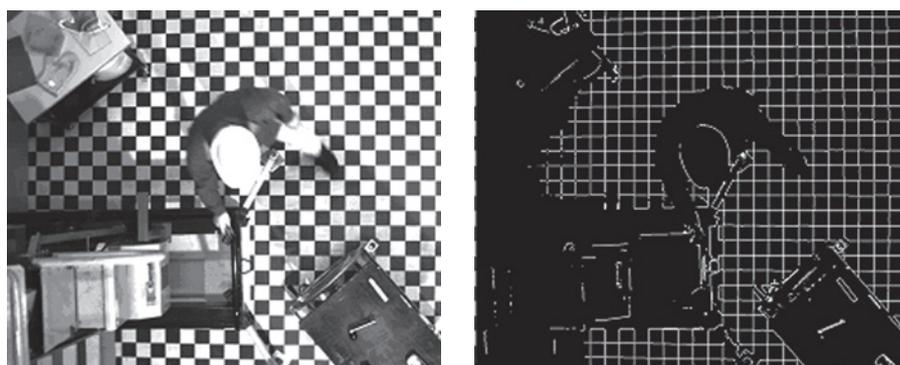
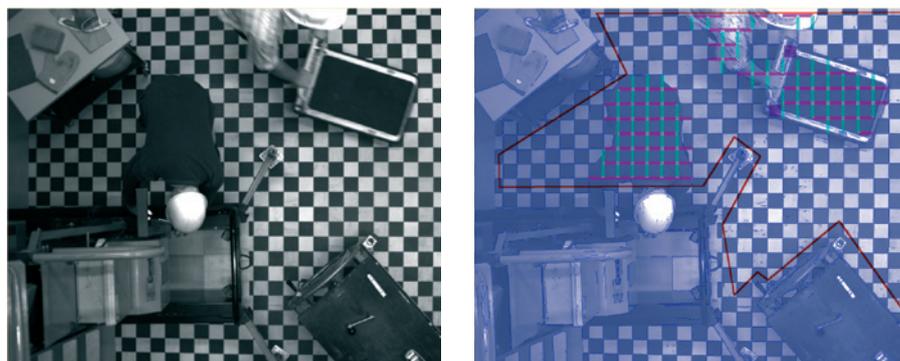


FIGURE 2

A gauche l'image d'une scène caractéristique d'un poste de travail et à droite l'image résultat. La zone de détection est délimitée par la ligne polygonale rouge. Les rectangles magenta et cyan représentent les contours verticaux et horizontaux manquants par rapport à l'image de référence

At left, image of a characteristic workstation scene; at right, the resulting image. Red polygon line delimits the detection zone. Magenta and cyan rectangles represent missing vertical and horizontal outlines with respect to the reference image



présence dans la zone dangereuse est activé. La *Figure 2* présente un exemple de détection.

Détection de l'apparition d'un marqueur couleur

Une autre solution consiste à marquer l'homme. La détection repose alors sur la reconnaissance de caractéristiques liées au marqueur. Le marqueur peut être matérialisé par un gilet haute visibilité [6, 7]. Ce type d'équipement possède des attributs couleurs parfaitement définis et identifiables. Une présence dans la zone dangereuse est alors détectée par apparition du marqueur dans l'image.

La couleur permet de distinguer trois types d'informations :

- la teinte : ce paramètre correspond aux dénominations des couleurs telles que rouge, vert, bleu, jaune, etc. Il est lié la *longueur d'onde dominante* d'un stimulus de couleur, c'est-à-dire la longueur d'onde pour laquelle l'énergie correspondante est la plus élevée. Le blanc, le noir ou les gris sont des couleurs qui n'ont pas de teinte. Elles sont dites *neutres* ou *achromatiques* ;

- la saturation : elle traduit une mesure de distance de la couleur par rapport à l'axe achromatique. Elle donne le degré de pureté de la couleur par rapport au blanc. Plus on est éloigné de l'axe achromatique, plus la couleur est pure. Ce paramètre permet, par exemple, de distinguer un bleu marine d'un bleu horizon ;

- la dernière composante, dite luminance, représente une sensation visuelle selon laquelle une surface paraît émettre plus ou moins de lumière. Elle correspond donc à une sensation traduite par des vocables comme clair, foncé, lumineux, sombre et caractérise le niveau lumineux d'un stimulus de couleur. Elle exprime une impression d'intensité lumineuse réfléchie par les surfaces composant la scène.

Les deux premières informations sont relativement stables par rapport aux variations de puissance de l'éclairage.

Les *Figures 3 et 4* illustrent ce principe de détection. La *Figure 3* montre une image couleur et sa projection dans un plan teinte - saturation. Les points 1 et 2 permettent de localiser le gilet dans le plan couleur. La *Figure 4* visualise l'uti-

FIGURE 3

Projection d'une image dans un plan teinte - saturation
Image projection onto a hue-saturation plane

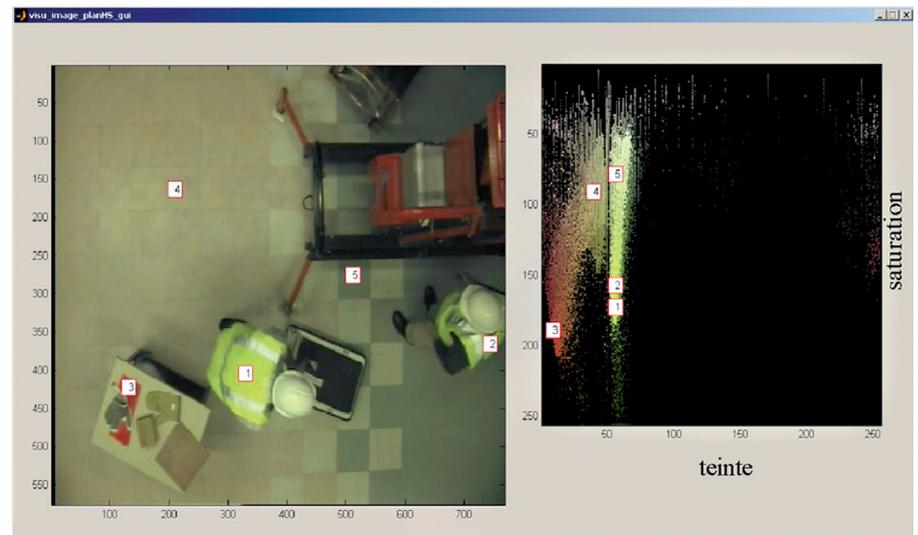
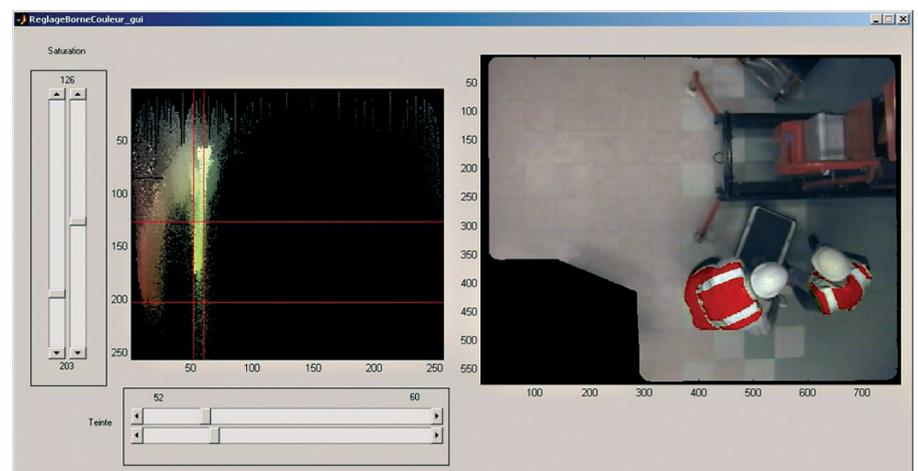


FIGURE 4

Application d'un double seuillage selon la teinte (axe horizontal) et la saturation (axe vertical) pour isoler dans une image les pixels représentant un gilet haute visibilité

Application of double thresholding based on hue (horizontal axis) and saturation (vertical axis) to isolate pixels representing a high-visibility vest in an image



lisation des caractéristiques couleurs du gilet. La sélection de couleurs, en ne retenant que certaines valeurs selon les deux axes du plan teinte - saturation, permet d'obtenir l'image binaire présentée sur la partie droite de la *Figure 4*. Les zones marquées en rouge représentent les points de l'image reflétant une présence.

DÉTECTION DANS LE PROCHE INFRAROUGE

La réflectivité de certains matériaux en proche infrarouge est différente de leur réflectivité dans le domaine visible. Par exemple, les fibres végétales comme le coton ou l'herbe réfléchissent beaucoup plus de rayonnement reçu dans le proche infrarouge (0,75 - 1 μm) que dans le champ du visible (0,4 - 0,75 μm) alors que d'autres matériaux comme l'asphalte ou le béton possèdent des caractéristi-

ques de réflectance semblables dans les deux domaines de la bande spectrale.

Comme pour la détection couleur, il s'agit de détecter un marqueur dont les propriétés visuelles peuvent être facilement identifiées dans une image. L'idée consiste à équiper les personnes, travaillant à proximité ou dans une zone protégée, de vêtements constitués de fibres réfléchissant un maximum du rayonnement reçu dans la plage de longueur d'onde $0,75 - 1 \mu\text{m}$. L'apport d'éclairage ambiant dans cette bande n'étant généralement pas suffisant, un apport d'éclairage est nécessaire. Le système est alors qualifié de système actif. Pour limiter les effets dus aux variations de l'éclairage ambiant dans le domaine du visible, un filtre spécifique est placé sur l'objectif de la caméra.

La *Figure 5* montre deux images d'une même scène. L'image de gauche est réalisée dans le domaine du visible et l'image de droite dans le domaine du proche infrarouge. On observe que les vêtements portés par la personne dans la scène ont une réponse différente dans les deux cas. Dans le visible, la réponse du pantalon est liée à la couleur du matériau. Dans le proche infrarouge, elle dépend essentiellement de la nature du matériau.

Le principe de détection est basé sur un seuillage de l'image. Les points dont le niveau de gris est supérieur à un certain niveau constituent les points candidats à la détection. Des objets sont construits à partir d'une analyse des connexités des pixels candidats et sont caractérisés par un vecteur descripteur. Ces descripteurs sont de nature géométrique, topologique et périmétrique [8, 9, 10]. Ces descripteurs sont utilisés pour qualifier l'objet selon deux catégories (détection d'une personne ou non). La *Figure 6* illustre un exemple de détection.

DÉTECTION DANS L'INFRAROUGE LOINTAIN

Il s'agit d'explorer la possibilité de s'affranchir de la contrainte d'un marqueur en utilisant une caractéristique remarquable et stable liée à l'homme. La température de son corps varie peu. La longueur d'onde pour laquelle le corps émet un maximum de rayonnement se situe autour de $9,5 \mu\text{m}$. Ce type de longueur d'onde se situe dans un domaine spectral qualifié de lointain infrarouge. Dans ce cas, le

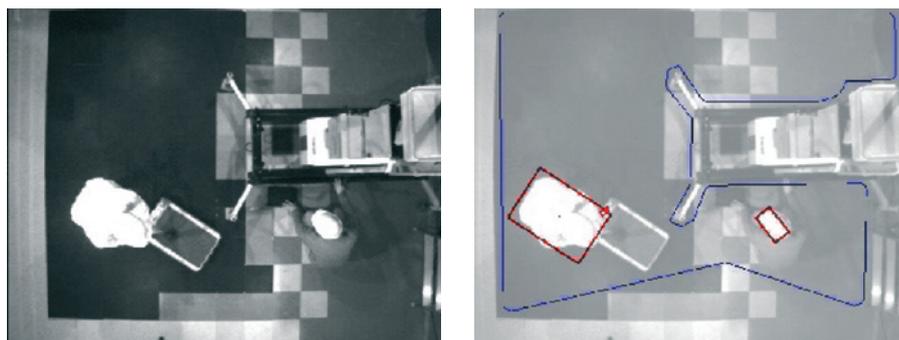
FIGURE 5

Illustration de la réflectivité des matériaux dans le domaine du visible à gauche et du proche infrarouge à droite
Illustration of material reflectability in visible (left) and near infrared (right) fields



FIGURE 6

A gauche l'image d'une scène caractéristique d'un poste de travail et à droite l'image résultat. La zone de détection est délimitée par la ligne polygonale bleue. Les cadres rouges marquent les présences détectées
At left, image of a workstation characteristic scene; at right, the resulting image. Blue polygon line delimits the detection zone. Red squares mark detected presences



capteur est sensible au rayonnement thermique émis par les corps constituant la scène. La *Figure 7* présente une image infrarouge. On constate sur cette image que l'homme est identifié par des points dont la réponse est maximale par rapport au domaine de sensibilité du capteur.

La détection de présence est alors obtenue par seuillage de l'image infrarouge. Les points dont le rayonnement thermique se situe autour de 37°C sont considérés candidats à la détection. Ils sont alors analysés selon des critères de voisinage. Les zones connexes issues de cette analyse sont caractérisées par des descripteurs comme la surface, la compacité, l'allongement, etc. Les descripteurs sont utilisés pour qualifier la zone selon deux catégories : présence humaine ou non. La *Figure 8* illustre la détection sur une image infrarouge lointain.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

MÉTHODES

La méthodologie mise en œuvre pour analyser les quatre dispositifs de détection proposés est la suivante :

- une analyse bibliographique sur les aspects matériels et algorithmiques liés à la détection sur des images dans les domaines du visible, de l'infrarouge et du proche infrarouge permettant d'évaluer l'impact des phénomènes physiques mis en jeu sur les images et d'identifier les perturbations environnementales pouvant gêner la détection. Elle a abouti à la constitution de bases d'images reflétant les effets induits par ces phénomènes ;
- le maquetage des traitements

FIGURE 7

Image infrarouge
Infrared image



pour détecter la présence de personnes dans la zone surveillée ;

- ▣ la qualification des traitements permettant de séparer deux populations d'images (avec ou sans présence) par la mise en œuvre de méthodes d'analyse de données ;

- ▣ des investigations dans le domaine des perturbations environnementales et des défaillances systématiques ;

- ▣ la confrontation des résultats par l'implémentation des traitements retenus sur une plate-forme expérimentale.

Pour analyser les performances de la chaîne de traitement, dans des conditions normales de fonctionnement, nous avons fait varier des critères tels que :

- ▣ l'éclairage global de la scène dans une plage variant d'une dizaine de lux à quelques milliers de lux ;

- ▣ l'angle d'incidence de la source d'éclairage ;

- ▣ la nature de l'illuminant ;

- ▣ la configuration des gilets haute visibilité ;

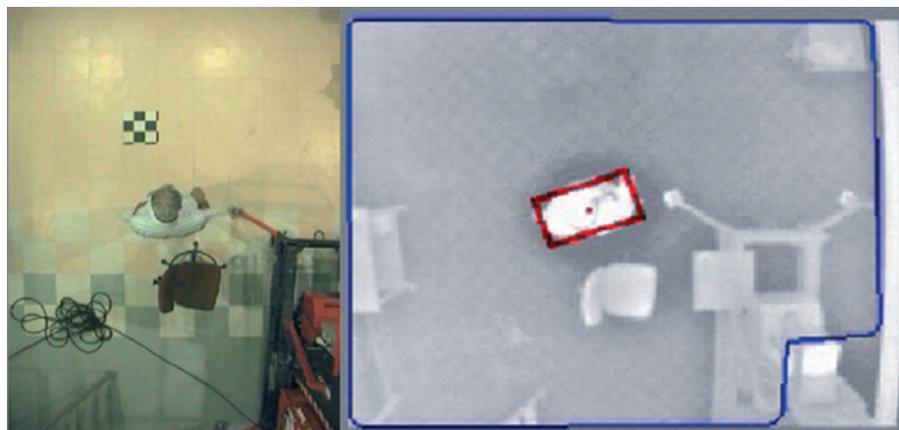
- ▣ le nombre de personnes présentes dans la zone protégée et leur position dans la zone de détection.

Dans le contexte des composants de sécurité, la prise en compte des défaillances aléatoires du matériel est primordiale [11, 12]. Il est donc nécessaire de détecter au plus tôt les dysfonctionnements et dérives potentielles du capteur d'images et de la chaîne de traitement avant qu'une altération de l'information à traiter puisse conduire à des résultats erronés et, en particulier, à des non-détections. Il s'agit donc de garantir la mise en repli du système lorsqu'une défaillance de celui-ci peut conduire à un résultat non attendu. Dans le cadre de notre travail, nous avons

FIGURE 8

A gauche, l'image, dans le domaine du visible, d'une scène caractéristique d'un poste de travail et, à droite, l'image-résultat dans le domaine de l'infrarouge. La zone de détection est délimitée par la ligne polygonale bleue. Le cadre rouge marque une présence détectée

At left, image in visible field of a workstation characteristic scene; at right, resulting image in infrared field. Blue polygon line delimits the detection zone. Red frame marks detected presence



limité notre analyse aux altérations de l'image pouvant provenir de dysfonctionnements du capteur et à l'altération des paramètres liés aux algorithmes de traitements de l'image.

MATÉRIEL

Pour constituer les bases d'images et valider les résultats, une plate-forme expérimentale a été réalisée (cf. Figure 9). Elle occupe une partie de bâtiment permettant un éclairage en lumière naturelle par une ouverture occultable au plafond (éclairage zénithal).

Elle est constituée :

- ▣ d'un support auquel sont fixés divers types de capteurs (cf. Tableau 1) ;

- ▣ de différentes sources lumineuses permettant de faire varier les conditions d'éclairage ;

- ▣ d'ordinateurs pour l'acquisition et le traitement des images ;

- ▣ d'un sol configurable à base de dalles permettant de simuler une mire au sol ou de travailler en champ libre. La surface couverte est de 5 x 4 mètres.

Dans le cadre de cette étude, l'hypothèse d'un capteur limitant l'accès à un poste de travail implanté à l'intérieur d'un bâtiment est privilégiée. Les possibilités d'éclairage implantées sur la plate-forme prennent donc en compte les recommandations émises par la norme

NF EN 12464 [13]. Afin de pouvoir analyser les performances du dispositif de détection, une caractérisation de l'éclairage de la plate-forme expérimentale a été réalisée pour différents illuminants (tubes fluos, halogène, lumière du jour). Des mesures d'éclairage ont été réalisées avec un luxmètre à une hauteur de 1 mètre du sol selon un maillage de 50 cm de côté. La Figure 10 visualise les courbes caractérisant l'éclairage pour différentes sources lumineuses.

RÉSULTATS - DISCUSSIONS

DÉTECTION DE CONTOURS

Analyse fonctionnelle

L'analyse des performances de l'algorithme de détection de présence par disparition des contours a été réalisée à partir d'une base de données constituée de 90 images. Dans cette base d'images, on dénombre 86 présences d'un homme dans la zone de détection. Certaines images peuvent refléter la présence de plusieurs personnes intervenant de manière simultanée dans la zone protégée. Enfin, une quarantaine d'images est vierge de toute présence. L'analyse de ces images a montré que la plage de fonctionnement garantissant une détection sûre en limitant le nom-

FIGURE 9

Vue de la plate-forme expérimentale
View of experimental platform



FIGURE 10

Caractérisation de la plate-forme en terme d'éclairage.
Les axes horizontaux représentent la localisation des points
de mesures dans la scène. L'axe vertical représente le niveau
d'éclairage
Platform characterisation in illumination terms. Horizontal axes
represent measuring point locations in the scene. Vertical axis
represents the illumination level

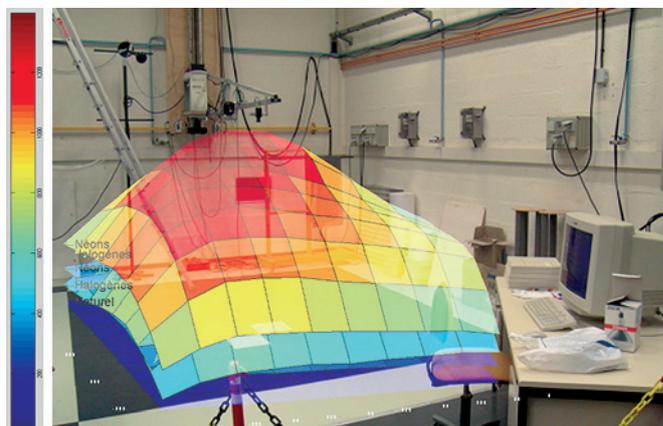


TABLEAU I

Les capteurs de vision mis en œuvre
Vision sensors implemented

Type d'informations	Caméra utilisée	Principales caractéristiques
Contour	JAI CV-M4	Monochrome numérique CCD 2/3", 1280 x 1024 pixels
Couleur	JAI MCL 1500	Couleur analogique CCD 1/3", 752 x 582 pixels
Proche infrarouge	JAI M 50 IR	Monochrome analogique CCD 1/2", 752 x 582 pixels avec filtre IR (passe haut 800 nm)
Infrarouge lointain	RAYTHEON 2000 B	Capteur ferro-électrique, analogique, 320 x 240 pixels

bre de fausses détections se restreint à un éclairage ambiant compris dans une fourchette de 200 à 1000 lux. En dehors de cet intervalle, on obtient systématiquement des détections qu'il y ait ou non présence réelle dans la zone protégée conduisant à l'indisponibilité de l'équipement associé au dispositif de détection. La *Figure 11* visualise quelques résultats de détection sur des images réalisées pour un éclairage moyen de 80 à 1500 lux.

Des tests fonctionnels en continu (une image toutes les 3 secondes) ont été réalisés sur la plate-forme expérimentale pour évaluer la robustesse de la chaîne de traitement en fonctionnement normal. Ces essais ont conduit à plus de 60 fausses détections pour 48 000 images. Ces fausses détections sont dues pour l'essentiel à de fortes variations locales d'éclairage. En occultant l'ouverture permettant l'éclairage naturel de la scène et avec un éclairage peu directif (fluos) des performances plus accepta-

bles sont obtenues : 3 fausses détections pour 52 200 images.

Analyse de modes de défaillance

Du point de vue sûreté de fonctionnement, il est nécessaire :

- ▣ de qualifier la validité des images et, ce, avant même d'envisager leurs traitements par l'algorithme de détection de présence ;
- ▣ de mettre en place des mécanismes capables de détecter et de traiter les défaillances au niveau des algorithmes de traitement de façon à ce qu'elles ne conduisent pas à une perte de la fonction de sécurité. On aborde ici principalement des pertes potentielles d'informations nécessaires à la détection.

À titre d'exemple, les causes potentielles de dysfonctionnement prises en compte pour cette analyse sont :

- ▣ des perturbations électromagnétiques pouvant altérer les signaux véhiculant l'image ;
- ▣ des dérives du système optique ;
- ▣ des altérations des mémoires contenant les informations nécessaires au traitement des images (perte de la référence, perte des seuils de détection, des paramètres de filtrage).

Le *Tableau II* présente un extrait de l'analyse des modes de défaillance. La *Figure 12* illustre l'effet de quelques modes de défaillance et leur effet sur la détection.

La stratégie de détection, qui consiste à rechercher par comparaison d'informations courantes par rapport à des informations de référence, comme la disparition de contours d'un marqueur au sol, contribue à réduire l'effet des défaillances aléatoires (perturbations électriques, défaillances de composants, etc.) sur la fonction de détection. En effet, ce principe autorise des autocon-

FIGURE 11

Illustration des performances de détection en fonction de variations d'éclairement
 Illustration of detection performances with respect to illumination variations



trôles périodiques de tout ou partie de la chaîne d'acquisition et de traitement des informations conduisant à la prise de décision du système. L'image courante peut être comparée à une image de référence mémorisée et, dès qu'un écart supérieur aux limites fonction-

nelles permises est détecté, le composant de sécurité commande l'arrêt de la machine.

TABLEAU 11

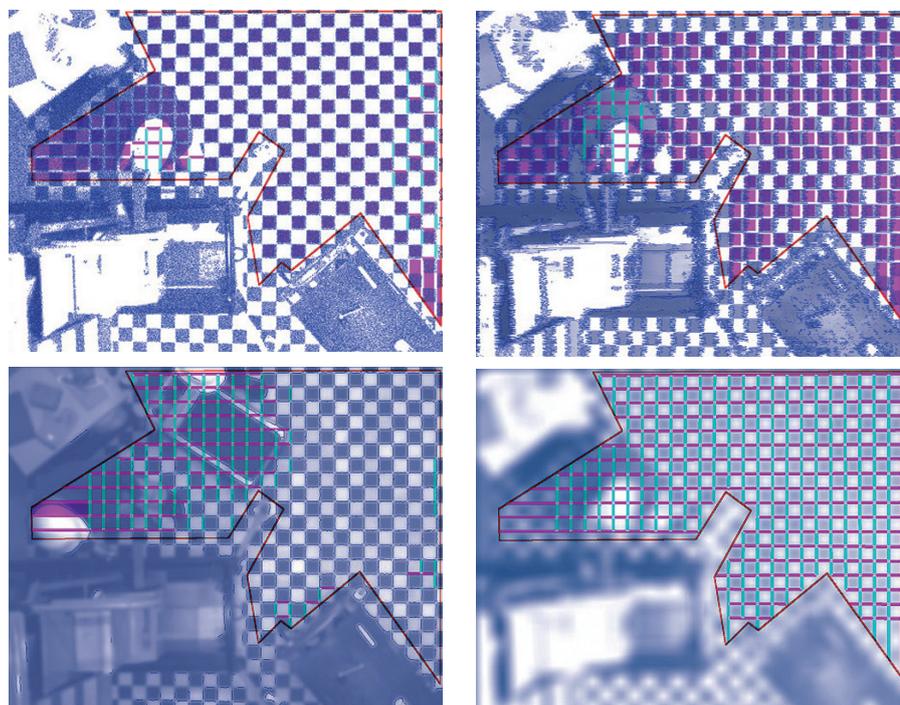
Extrait de l'analyse des modes de défaillance
Failure mode analysis extract

Fonction	Mode de défaillance	Cause potentielle	Effet	Contrôle
Réaliser une image	Image bruitée	Perturbations électromagnétiques	Non-détection d'une présence réelle	Contrôle assuré par le marquage du sol
	Image présentant un aspect structurel erratique	Perturbations électromagnétiques ou défaillance de composants du capteur d'image	Non-détection d'une présence réelle	Contrôle assuré par le marquage du sol
	Image présentant des couleurs non représentatives de la scène	Défaillance de composants du capteur d'image	Non-détection d'une présence réelle	Contrôle assuré par le marquage du sol
	Image floue	Dérive des réglages de l'optique (vibrations)	Non-détection d'une présence réelle	Contrôle assuré par le marquage du sol
	Image noire	Panne du capteur d'image	Non-détection d'une présence réelle	Contrôle assuré par le marquage du sol
Segmenter l'image (seuillage)	Résultat de segmentation (image binaire) non représentatif de la réalité	Perte des valeurs des seuils (altération des mémoires les contenant)	Non-détection d'une présence réelle sur détection	Contrôle assuré par le marquage du sol

FIGURE 12

Quelques exemples d'effets induits par différents modes de défaillance avec en haut à gauche une légère sur-détection due à l'injection de bruit sur le signal véhiculant l'image, en haut à droite une forte sur-détection induite par l'altération du signal de synchronisation des lignes, en bas à gauche et à droite une sur-détection plus ou moins prononcée imputable à une dérive de l'optique

Some examples of effects induced by different failure modes. At top left, slight overdetection due to interference in the image-carrying signal. At top right, extreme overdetection induced by line synchronisation signal alteration. At bottom left and right, more or less pronounced overdetection due to optical drift



DÉTECTION DE MARQUEURS COULEUR

Analyse fonctionnelle

L'analyse des performances de l'algorithme basé sur la détection couleur a été réalisée à partir d'une base de données constituée de 230 images. Dans cette base d'images, on dénombre 109 présences humaines dans la zone de détection. Une première analyse a montré que, pour les faibles éclairagements (< 100 lux) et les très forts éclairagements (> 2 000 lux), on obtient systématiquement des cas pour lesquels une présence réelle n'est pas détectée. Ces non-détections conduisent à une mauvaise décision mettant en péril la sécurité d'un opérateur pénétrant dans la zone protégée. Pour remédier à ce problème, nous avons choisi d'intégrer un test sur les histogrammes de niveaux de gris en amont de la chaîne de traitement de manière à assurer la mise en repli du capteur. La Figure 13 visualise quelques exemples de détection.

Une seconde analyse en condition de fonctionnement normal a mis en évidence l'impact de la température de couleur des sources d'éclairage sur la détection. La réponse du gilet se déplace principalement selon l'axe des teintes en fonction de la nature de l'excitation lumineuse (cf. Figure 14). Pour illustrer ce propos, considérons un exemple de situation pouvant engendrer des erreurs de détection. Le système de détection de présence est situé dans un local

FIGURE 13

Illustration des performances de détection en fonction de variations d'éclairément
 Illustration of detection performances with respect to illumination variation

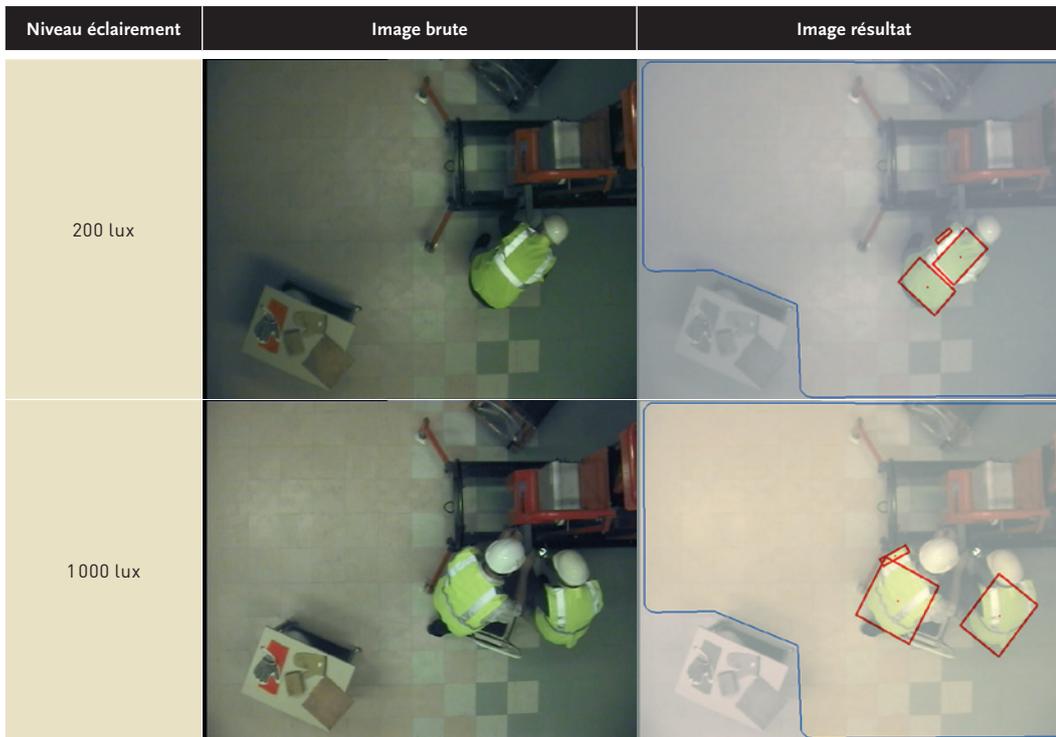


FIGURE 14

Dérive de la réponse du gilet due à la température de couleur de l'illuminant. Les valeurs des seuils de référence sur la teinte et la saturation permettant de segmenter l'image ont été positionnées pour un éclairage en lumière naturelle. Pour une image réalisée avec un apport d'éclairage en halogène, la réponse du gilet est située en dehors du domaine attendu dans le plan teinte - saturation et conduit à une non-détection

Drift in vest response due to illuminating source colour temperature. Reference threshold values on hue and saturation, which allow image segmentation, have been positioned for natural light illumination. For an image produced using halogen lighting, vest response is located outside the expected range in the hue-saturation plane and causes non-detection

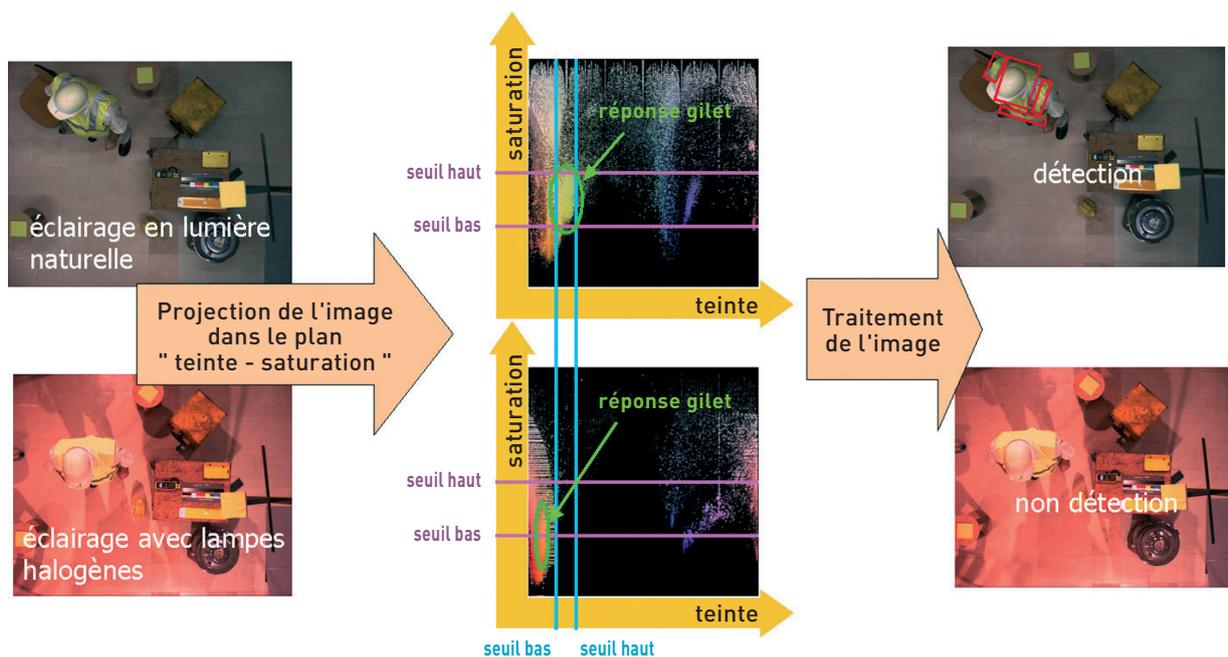


FIGURE 15

Introduction de mire test dans la scène
Introduction of a test pattern into the scene



éclairé en lumière naturelle. Il est réglé pour ces conditions d'éclairage et fonctionne la plupart du temps dans ces conditions. Exceptionnellement, l'équipement est utilisé en nocturne. Il est alors nécessaire d'apporter de l'éclairage artificiellement. Selon le spectre d'émission de cet éclairage, l'adéquation entre la réponse du gilet à cet illuminant et la réponse attendue par les paramètres du système n'est plus respectée et conduit à des erreurs de détection.

La définition des seuils sur la composante de teinte doit être réalisée avec prudence. Ces seuils doivent prendre en compte la réponse du gilet pour l'ensemble des sources lumineuses pouvant

éclairer la scène dans des conditions normales de fonctionnement. Pour garantir la fonction de détection, un contrôle de dérive doit impérativement être mis en place car une source d'éclairage additionnelle peut toujours être apportée. Une solution consiste à positionner des cibles dans la scène (cf. Figure 15). Elles permettent de tester en continu la fonction de détection. Pour chaque image, on compte le nombre de pixels détectés par l'algorithme de seuillage et, ce, pour chaque cible de l'image. Le nombre de pixels de chaque cible est comparé à une référence constituée lors de la phase de réglage du système.

Des tests fonctionnels en continu (une image toutes les 2 secondes) ont été réalisés sur la plate-forme expérimentale pour évaluer la robustesse de la chaîne de traitement en fonctionnement normal. On a obtenu 3 fausses détections pour 102700 images dans une plage d'éclairage située entre 100 et 1500 lux.

Analyse des modes de défaillance

Pour aborder le point de vue sûreté de fonctionnement, il a été nécessaire de qualifier la validité des images avant même d'envisager leurs traitements par l'algorithme de détection de présence, de mettre en place des mécanismes capables de détecter et de traiter les défaillances au niveau des algorithmes

de traitement de façon à ce qu'elles ne conduisent pas à une perte de la fonction de sécurité. Pour cette analyse nous avons suivi une démarche identique à celle présentée ci-dessus pour la détection basée sur les contours. Le Tableau III présente un extrait de l'analyse des modes de défaillance. La Figure 16 illustre l'effet de quelques modes de défaillance.

La stratégie de détection choisie qui, contrairement au principe de disparition de contours, ne fonctionne pas par comparaison à une référence, ne contribue pas naturellement à réduire l'effet des défaillances aléatoires (perturbations électriques, défaillances de composants, etc.) sur la fonction de détection. Pour autoriser des autocontrôles périodiques de tout ou partie de la chaîne d'acquisition et de traitement, il est nécessaire de développer des stratégies de test sur des éléments de l'image dont les caractéristiques sont connues. À titre d'exemple, une méthode consiste à introduire des cibles tests dans la scène. Les descripteurs des zones de l'image courante couverte par ces cibles peuvent alors être comparés à une référence mémorisée lors de la phase de mise en service du système. Dès qu'un écart supérieur aux limites fonctionnelles permises est détecté, le système se met en repli et commande l'arrêt de la machine auquel il est associé.

TABLEAU III

Synthèse des modes de défaillance
Failure mode summary

Fonction	Mode de défaillance	Cause potentielle	Effet	Contrôle
Réaliser une image	Image bruitée	Perturbations électromagnétiques	Non-détection d'une présence réelle	Contrôle de la détection sur des cibles-test intégrées à la scène
	Image présentant un aspect structurel erratique	Perturbations électromagnétiques ou défaillance de composants du capteur d'image	Non-détection d'une présence réelle	Contrôle de la détection sur des cibles-test intégrées à la scène
	Image présentant des couleurs non représentatives de la scène	Défaillance de composants du capteur d'image	Non-détection d'une présence réelle	Contrôle de la détection sur des mires-cibles intégrées à la scène
	Image floue	Dérive des réglages de l'optique (vibrations)	Non-détection d'une présence réelle	Contrôle de la détection sur des cibles-test intégrées à la scène
	Image noire	Éclairage de la scène absent ou insuffisant	Non-détection d'une présence réelle	Contrôle de la dynamique des signaux (histogrammes)
Segmenter l'image (seuillage)	Résultat de segmentation (image binaire) non représentatif de la réalité	Perte des valeurs des seuils (altération des mémoires les contenant)	Non-détection d'une présence réelle Sur-détection	Contrôle de la détection sur des cibles-test intégrées à la scène

FIGURE 16

Quelques exemples d'effets induits par différents modes de défaillance avec en haut à gauche une non-détection due à l'injection de bruit sur le signal véhiculant l'image ; en haut à droite, une détection satisfaisante malgré l'altération du signal de synchronisation des lignes ; en bas à gauche, un résultat de détection conforme à l'attendu en dépit d'un dérèglement de l'optique et, enfin, en bas à droite, une non-détection provoquée par la perte d'un signal couleur (vert)

Some examples of effects induced by different failure modes. At top left, non-detection due to interference in image-carrying signal. At top right, satisfactory detection despite alteration of line synchronisation signal. At bottom left, expected detection result despite optical misadjustment. At bottom right, non-detection caused by loss of colour signal (green)

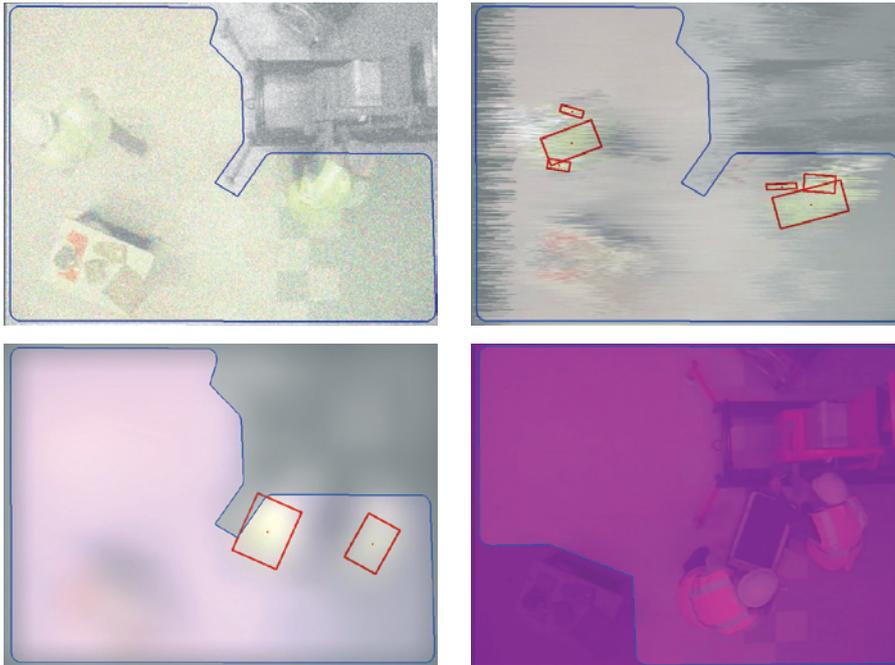
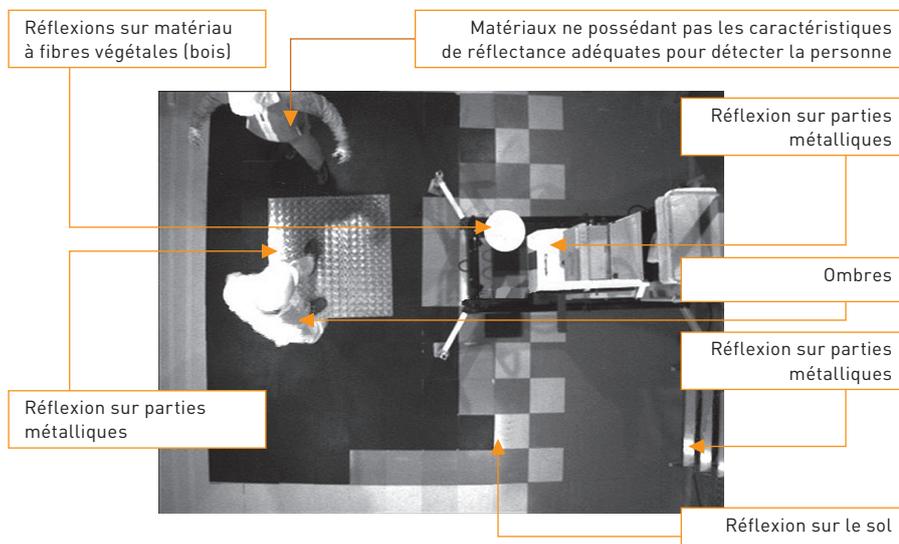


FIGURE 17

Perturbations constituant des sources de fausses détections ou de non-détections en proche infrarouge

Disturbance inducing sources of wrong or non-detection in near infrared field



LE PROCHE INFRAROUGE

L'analyse fonctionnelle d'un principe de détection basé sur des images infrarouges a été réalisée à partir d'une base de données constituée de 138 images. Dans cette base d'images il y a 164 présences d'une personne dans la zone de détection. Pour certaines images de la base, il y a plusieurs personnes dans la zone de détection. Un tiers des images est vierge de toute présence. L'étude fonctionnelle a montré que le principe de détection de personne, basé sur le traitement d'images proche infrarouge, n'était pas raisonnablement envisageable compte tenu d'un certain nombre de limitations :

- une sensibilité à certaines perturbations environnementales telles que les reflets ;
- la nécessité d'un apport de lumière dans la bande 0,75 - 1 μm dont un des inconvénients majeurs est un dégagement important de chaleur ;
- la contrainte, pour les personnes intervenant dans la zone de détection, de porter des vêtements constitués d'un tissu d'origine végétale (coton, par exemple) ;
- la difficulté de définir les matériaux possibles pour les vêtements.

La Figure 17 illustre ces difficultés de détection.

L'INFRAROUGE LOINTAIN

L'étude fonctionnelle d'un dispositif de détection de personnes basé sur un capteur infrarouge passif a permis de mettre en évidence et surtout de comprendre les apports et les difficultés de détection de l'homme dans la bande de l'infrarouge lointain (7-14 μm). Dans cette bande, l'homme, par son émission spécifique autour des 9,5 μm , apparaît clairement dans la scène sans avoir recours à un marquage spécifique. C'est là un des avantages majeurs qui nous a conduit à nous intéresser à ce type de technologie. De plus, les inconvénients du domaine du visible, tels que les ombres ou la surexposition photonique des cellules CCD (ou CMOS) induites par de fortes illuminations, sont gommés par la technologie infrarouge. L'analyse a permis de mettre en exergue des phénomènes conduisant à des erreurs de détection. Ces difficultés de détection ont pour origine :

- des phénomènes de rémanence thermique (cf. Figure 18) ;

FIGURE 18

Phénomène de rémanence thermique
Thermal remanence phenomenon

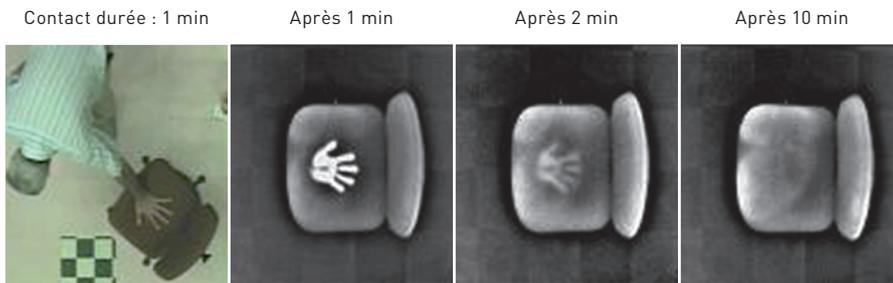
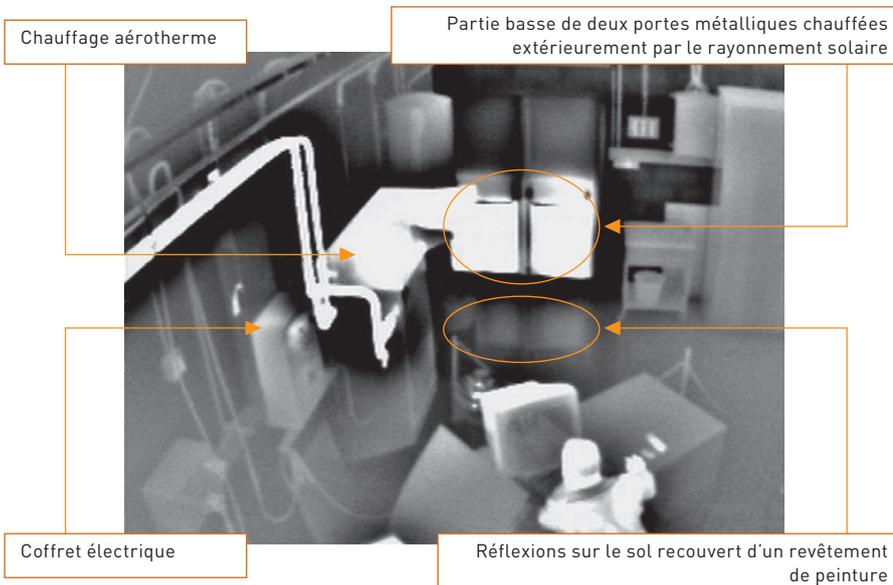


FIGURE 19

Perturbations thermiques constituant des sources de fausses détections
Thermal disturbances constituting sources of wrong detection



■ des sources thermiques diverses telles que l'incidence du rayonnement solaire sur certains matériaux, l'alimentation d'appareils électriques, les conduites d'eau chaude (cf. Figure 19) ;

■ des matériaux (le cuivre, l'aluminium et certaines peintures brillantes) se révélant être de parfaits miroirs induisant des réflexions parasites ;

■ des phénomènes de saturation du capteur face à des points chauds de la scène rendant le capteur partiellement aveugle autour de ces sources thermiques ;

■ les matériaux constituant certains vêtements sont plus ou moins isolants et peuvent constituer des obstacles au rayonnement du corps humain pouvant le rendre invisible pour la fonction de détection.

Du fait des multiples difficultés mises en évidence par l'étude fonctionnelle, il n'est pas concevable d'envisager de réaliser une fonction de détection de personne basée sur un capteur infrarouge passif. En effet, de nombreuses sources de pollution thermique pourraient être à l'origine de fausses détections et donc nuire au critère de disponibilité nécessaire à tout composant de sécurité. De plus, dans certaines conditions, on peut avoir un équilibre thermique entre l'environnement et l'homme dont les vêtements peuvent jouer un rôle de filtre, le rendant invisible au système. Dans ce cas, la fonction de sécurité n'est pas assurée.

DISCUSSION, SYNTHÈSE

Dans cet article, quatre principes de détection de personnes basés sur des techniques de vision numérique ont été analysés. Le *Tableau IV* synthétise les enseignements que l'on peut retirer de ce travail. On en retiendra que la détection d'une présence humaine dans une scène représentative d'une situation de travail en milieu industriel n'est pas une tâche aisée car l'homme dans une image ne possède pas de caractéristiques propres permettant une identification sûre et robuste. Il est donc nécessaire de le singulariser de l'environnement en l'associant à un marqueur. La voie la plus prometteuse pour une détection fiable et robuste est la détection couleur d'un gilet haute visibilité. Les résultats de détection dans ce contexte sont positifs. Un système basé sur ce principe de détection permet d'apporter la souplesse attendue en termes de définition de zone et une meilleure discrimination entre la présence d'un homme et l'introduction d'objet manufacturé dans la zone protégée. Ce principe de détection doit être complété par des mesures organisationnelles permettant de s'assurer que chaque personne intervenant dans et à proximité de la zone protégée porte le gilet.

CONCLUSION

Bien que la vision artificielle ait connu de grands progrès en termes de performances et se soit largement démocratisée cette dernière décennie dans le domaine du contrôle manufacturier, elle reste encore à l'état d'objet expérimental pour la détection de personnes dans des zones dangereuses [14, 15]. Les dispositifs certifiés pour des applications de sécurité restent marginaux et très spécifiques. On peut citer à titre d'exemple le SVD¹ [16] développé par la société CNIM² pour la gestion de redémarrages à distance d'escalators et le SICK V4000 pour la protection de la zone de pliage des presses à métaux. Les difficultés tiennent au fait que, premièrement, l'objet de la détection (l'homme) n'est pas facilement modélisable et,

¹ SVD : Safety Video Detector.

² CNIM : Constructions Industrielles de la Méditerranée.

TABLEAU IV

Synthèse des principes de détection analysés
Summary of analysed detection principles

Technologie	Apports	Limites
Contours	Détection facilitée par le marquage du sol	Sensible aux très forts éclairagements
	Bonnes performances de détection dans une plage d'éclairément	Sensible aux très fortes variations d'éclairément locales
	Bonne garantie de mise en repli du système face à de nombreux types de perturbations.	Ne permet pas de différencier l'homme du contexte
		Nécessite un traitement particulier du sol (problèmes de résistance à l'usure)
Couleur	Détection facilitée par marquage (gilet)	Sensible aux très forts éclairagements
	Bonnes performances de détection dans une plage d'éclairément satisfaisante	Sensible aux changements de couleur de l'illuminant
	Permet de différencier l'homme du contexte	Nécessite l'ajout de traitements spécifiques pour garantir la mise en repli
	Bonne robustesse à certaines perturbations	Coût du capteur et de la chaîne de traitement
		Nécessité d'équiper les opérateurs d'un gilet
Proche infrarouge	Moins sensible aux variations de l'éclairément ambiant	Détection active (apport de lumière dégageant une énergie thermique)
	Pas d'empreintes thermiques	Pas de résistance aux fortes sources de lumière
	Possibilité de détection en champ libre	Contraintes sur le matériau des vêtements de travail
	Coût (mise en œuvre capteur CMOS)	
Infrarouge lointain	Insensible au rayonnement réfléchi dans le domaine du visible donc aux variations d'éclairément (ombres, reflets, obscurité)	Inertie : empreintes thermiques, recherche d'équilibre
		Toutes sources de rayonnement thermique appartenant à la plage de sensibilité du capteur difficile à filtrer
		Réflectivité et opacité des matériaux différents du visible
		Coût des capteurs

deuxièmement, les conditions d'éclairément ne peuvent pas être suffisamment maîtrisées contrairement à la plupart des applications de l'industrie manufacturière (contrôle de conformité de produits). Pour pallier la première difficulté, deux hypothèses ont été formulées. La première consistait à apporter à l'homme des éléments permettant de le rendre différentiable de son environnement. La seconde consiste à utiliser une caractéristique de l'homme peu variable et potentiellement différentiable du milieu dans lequel il évolue.

Deux principes basés sur l'apport d'éléments caractéristiques pour discriminer l'homme de son environnement ont été analysés. Le premier consistait à marquer la zone à protéger par une mire au sol dont les propriétés sont aisément modélisées par des paramètres simples et robustes. Il s'agit alors de détecter une

présence par la disparition d'un élément connu simplifiant ainsi le problème du critère de détection. Le second principe consistait à apporter à l'objet de la détection (l'homme), une caractéristique facilement identifiable et séparable du contexte en l'équipant d'un marqueur. Ce marqueur est matérialisé par des vêtements caractérisés soit par une couleur particulière, soit par un matériau possédant des propriétés de réflectance. Pour la couleur, un gilet haute visibilité tel qu'utilisé dans certains secteurs d'activité comme le BTP, les sites de traitement des déchets... a été retenu. Pour le matériau, des vêtements en coton ayant une réflectivité maximum dans le domaine proche infrarouge ont été sélectionnés. Enfin, l'aptitude d'un système d'imagerie infrarouge à détecter une présence par le biais du rayonnement thermique du corps humain a été analysée.

Les analyses ont montré qu'une mise en situation du principe basé sur le marquage du sol de la zone dangereuse est robuste dans une plage d'éclairément restreinte. Un des avantages de ce type de système réside dans le fait que la mire couvre la totalité de la zone. Il est ainsi possible de faire un diagnostic naturel de la fonction de détection. Cependant, la mire au sol constitue une contrainte. Elle est soumise à usure, salissures, pouvant rendre le système inapte à la fonction de détection. En outre, le principe est assez sensible aux très faibles et aux très forts éclairéments ce qui pose des problèmes de disponibilité de l'équipement sur lequel il doit agir.

L'étude d'un système basé sur la détection d'un marqueur sur l'homme a abouti à deux types de résultats. La matérialisation du marqueur par un matériau possédant une réponse par-

ticulière dans le domaine du proche infrarouge n'est pas encourageante. Par contre, l'utilisation d'un marqueur couleur (gilet haute visibilité) autorise une détection robuste et fiable dans une plage de variation des conditions environnementales acceptable. Pour assurer une détection sûre, une analyse des modes de défaillance a montré la nécessité de développer des stratégies de contrôle.

L'analyse d'un système en infrarouge lointain a mis en évidence plusieurs inconvénients rédhibitoires. L'obstacle

majeur vient de la rémanence due au phénomène physique mis en jeu. Une empreinte thermique peut subsister longtemps dans la scène après le départ de l'homme de la zone protégée et créer des fausses détections. D'autre part, le rayonnement thermique du corps n'est pas toujours distinguable d'autres sources d'émission dans la scène..

En conclusion, il est possible de détecter de façon sûre et avec de bonnes performances une personne dans une zone dangereuse avec des techniques de vision. Néanmoins, comparativement aux

dispositifs de type barrages immatériels ou scrutateurs laser, la souplesse apportée par la vision a un coût induit par une chaîne de traitement beaucoup plus complexe. En outre, il faudra tenir compte des aspects éthiques liés au déploiement de caméras dans les ateliers.

Reçu le : 25/05/2007

Accepté le : 28/06/2007

BIBLIOGRAPHIE

[1] Big Brother is watching you – Jautomatise n° 51 – Mars-Avril 2007, ISSN 1293-1950, pp. 26-28

[2] MARSOT J., BUCHWEILLER J.P., CICCOTELLI J. – Détection de personnes en zone dangereuse : Apports et difficultés de la vision industrielle – INRS, Cahiers de Notes Documentaires, 188, 2002, 6 p.

[3] MARSOT J., GARDEUX F., BUCHWEILLER J.P., CICCOTELLI J. – Détection de personnes par vision industrielle – 4^{ème} Conférence Internationale sur l'Automatisation Industrielle, 9-11 juin 2003, Montréal, Canada, 4 p.

[4] GARDEUX F., MARSOT J. – Dispositif de protection par vision. Analyse paramétrique de descripteurs d'images permettant de détecter les altérations d'une texture connue (mire) – Note scientifique et technique, NS 249, INRS, Décembre 2004, 112 p.

[5] The Japan Machinery Federation, "Development for the International Standards in the field of Safety Machinery – A vision-based protective device (VBPD)", The Japanese National Committee for IEC/TC44, October 2001, 36p.

[6] NF EN 471 – Vêtements de signalisation à haute visibilité pour usage professionnel. Méthodes d'essais et exigences – AFNOR, ISSN 0335-3931, Mai 2004, 24 p.

[7] NF EN 340 – Vêtements de protection. Exigences générales – AFNOR, Juin 2004, 24 p.

[8] GONZALEZ R.C., WINTZ P. – *Digital Image Processing*, Addison-Wesley Publishing Company, Second Edition, 503 p., ISBN 0-201-1026-1, pp. 402-412, november 1987.

[9] GONZALEZ R., RICHARD E. – Woods, *Digital Image Processing*, 2 ed, Prentice Hall Press, ISBN 0-201-18075-8, 2002, 295 p.

[10] HARALICK, ROBERT M. and SHAPIRO L. G. – *Computer and Robot Vision*, Volume I. Addison-Wesley, 1992, pp. 28-48.

[11] Directive 98/37/CE du 22 juin 1998 – Rapprochement des législations des états membres relatives aux machines – JO-CE n° L 207/1 du 23 juillet 1998, 46 p.

[12] CEI EN 61496-1 – Sécurité des machines. équipement de protection électrosensibles. Partie 1 : Prescriptions générales et essais – CENELEC, Mars 1997, 96 p.

[13] NF EN 12464 – "Lumière et éclairage. Eclairage des lieux de travail – partie 1 : lieux de travail intérieur" – AFNOR, Juin 2003, 47 p.

[14] BÖMER T. – Vision based protective devices (VBPD). A vision becomes reality - Proceedings of the 3rd International Conference Safety of Industrial Automated System, 13-15 octobre 2003, Nancy, France, 5 p.

[15] TechUpdate. Camera sensor for press-brake safeguarding, MetalForming, p15, February 2005.

[16] GHIBAUDEAU G. – Safety Video Detector, secured camera detection system and method for mechanical system control - Proceedings of the 2nd International conference Safety of Industrial Automated Systems, 13-15 november 2001, BGIA, Bonn, Germany, pp. 289-295.