

Systèmes de détection des objets sur les pistes d'aérodrome

Étude exploratoire

Rapport d'étude



Ressources, territoires, habitats et logement
Énergies et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**

Systèmes de détection des objets sur les pistes d'aérodrome

Étude exploratoire

Rapport d'étude

Service technique de l'aviation civile
Département Aménagement, Capacité, Environnement

Rédacteur Pierre THERY

Vérificateur Frédéric FUSO

Approbateur Jean-Philippe DUFOUR

Avril 2010

Sommaire

1 INTRODUCTION	10
1.1 Objet du document	10
1.2 Guide de lecture	10
2 DOCUMENTATION ET REFERENCES	10
2.1 Références documentaires	10
2.2 Références des données	11
2.3 Référence des termes employés	11
3 METHODOLOGIE DE L'ETUDE	11
3.1 Analyse du problème, des exigences et hypothèses	11
3.2 Approche méthodologique	12
3.2.1 Points traités dans le cadre de l'étude	12
3.2.2 Limites de l'étude	12
4 FONCTION ESSENTIELLES DES SYSTEMES DE DETECTION	13
4.1 Relations entre la réglementation actuelle et les systèmes	13
4.1.1 Réglementation relative à la lutte contre le péril animalier	13
4.1.2 Réglementation relative aux inspections de l'aire de mouvement	13
4.1.3 Conclusion	14
4.2 Définition des objets	15
4.2.1 Les « débris »	15
4.2.2 Les animaux	16
4.2.3 Conclusion	17
4.3 Zone de détection des objets	17
4.3.1 Les collisions directes	17
4.3.2 Les collisions par aspiration	17
4.3.3 Les collisions par projection	17
4.3.4 Cas des prolongements d'arrêt	18
4.3.5 Cas des seuils décalés	18
4.3.6 Conclusions	18
4.4 Les types d'objets présents sur les pistes d'aérodrome	18
4.4.1 Les débris	18
4.4.2 Les animaux	28

4.5 Périmètre fonctionnel des systèmes automatiques de détection	32
4.5.1 Exigences fonctionnelles	32
4.5.2 Exigences opérationnelles	33
4.5.3 Exigences de performances	34
 5 SPECIFICATIONS LIEES A L'INTEGRATION DES SYSTEMES SUR LES AERODROMES	 36
5.1 Les contraintes d'implantation	36
5.1.1 La piste elle-même et ses accotements	36
5.1.2 Les prolongements d'arrêt	36
5.1.3 Les prolongements dégagés	36
5.1.4 Les aires de sécurités d'extrémités de piste	37
5.1.5 Les bandes de piste	37
5.1.6 Les aires d'avant seuil	37
5.1.7 Les voies de circulation	38
5.1.8 Les bandes de voies de circulation	38
5.1.9 Les servitudes	38
5.1.10 Les dégagements	39
5.1.11 Schéma synthétique des contraintes de site	40
5.2 Les contraintes de fonctionnement	41
5.3 Les contraintes d'exploitation de l'aérodrome	42
5.4 Les contraintes d'exploitation sur les systèmes	42
 6 GENERALITES SUR LES SYSTEMES UTILISABLES POUR LA LUTTE CONTRE LES OBJETS ETRANGERS SUR LES PISTES D'AERODROME	 44
6.1 Identification des systèmes	44
6.1.1 Méthode de recherche	44
6.1.2 Sélection des systèmes	44
6.2 Principes généraux des systèmes de détection	44
6.2.1 Principe de fonctionnement d'un système de détection	45
6.2.2 Définitions	45
6.3 Grandeurs caractéristiques d'un système de détection	46
6.3.1 Fausses alarmes	47
6.3.2 Principes des technologies de détection utilisées	47
 7 DESCRIPTION ET ANALYSE DES SYSTEMES SUSCEPTIBLES D'ETRE IMPLANTES SUR LES AERODROMES	 64
7.1 Le système QinetiQ (Tarsier)	64
7.1.1 - Description du système	64
7.1.2 - Analyse du système	73

7.1.3 Conclusions	79
7.2 Le système Stratech (iFerret)	80
7.2.1 - Description du système	80
7.2.2 - Analyse du système	86
7.2.3 - Conclusions	91
7.3 Le système Xsight (FODetect)	92
7.3.1 Description du système	92
7.3.2 Analyse du système	98
7.3.3 Conclusions	104
7.4 Système LaserOptronix (Global FOD Grabber)	105
8 CONCLUSION GENERALE	106
8.1 - Conclusions sur les systèmes	106
8.1.1 - Sur l'utilité de tels systèmes	106
8.1.2 - Sur les systèmes existants	106
8.1.3 - Sur l'évolution de la réglementation	107
8.2 - Perspectives	107
8.2.1 - Nécessité de conduire des tests	107
8.2.2 - Veille technique	107
8.2.3 - Amélioration de la connaissance des objets étrangers	107
8.2.4 - Elargissement du domaine d'utilisation de tels systèmes	108

Liste des figures et images

Figure 1 : Bouchon de feu encastré (source ADP)	16
Figure 2 : Bouchon de réservoir d'avion (source ADP)	16
Figure 3 : Lame métallique – origine inconnue (source ADP)	16
Figure 4 : Morceau de pneu d'aéronef (source ADP)	16
Figure 5 : Décomposition de la chaussée de manière symétrique	19
Figure 6 : Représentation de la répartition des débris collectés par zone	19
Figure 7 : Graphique représentant la provenance des objets	21
Figure 8 : Graphiques représentant la répartition des objets selon leur hauteur	23
Figure 9 : Graphiques représentant la répartition des objets selon leur section verticale	24
Figure 10 : Première face (photo : source ADP)	25
Figure 11 : Seconde face (photo : source ADP)	25
Figure 12 : Répartition des objets par couleur	26
Figure 13 : Répartition des objets par matière constitutive	27
Figure 14 : Nombre d'événements en fonction de la taille de l'oiseau et du type d'événement	29
Figure 15 : Nombre d'événements en fonction de l'envergure de l'oiseau et du type d'événement	30
Figure 16 : Nombre d'événements en fonction de la masse de l'oiseau et du type d'événement	30
Figure 17 : Analyse de la corrélation entre la taille, l'envergure et la masse des oiseaux	31
Figure 18 : Apparence générale des servitudes (source ITAC)	39
Figure 19 : Vue de dessus des contraintes de site	40
Figure 20 : Coupe transversale des contraintes de site	41

Figure 21 : Coupe longitudinale des contraintes de site	41
Figure 22 : Principe de fonctionnement d'un système de détection (source LEAT)	45
Figure 23 : Distinction système actif – système passif	46
Figure 24 : Champ de vision d'une caméra	50
Figure 25 : Géométrie du modèle de caméra (où C est le centre optique de la caméra et O le centre du capteur photosensible [7])	53
Figure 26 : Configuration radar bistatique	55
Figure 27 : Configuration radar monostatique	55
Figure 28 : Réflexion sur un plan métallique parfait	56
Figure 29 : FMCW à modulation en dents de scie	57
Figure 30 : Faisceau d'observation	58
Figure 31 : Résolution en azimut et élévation	59
Figure 32 : Les principes de détection lidar [20]	60
Figure 33 : Radar de détection (source QinetiQ)	64
Figure 34 : Paramètres du système (source QinetiQ)	65
Figure 35 : Le pylône et l'unité associée (source STAC)	65
Figure 36 : Conteneur technique (source STAC)	66
Figure 37 : Synoptique de l'installation Tarsier (source QinetiQ)	67
Figure 38 : Zones de détection pour une piste équipée de 2 radars (source QinetiQ)	68
Figure 39 : Interface graphique en mode utilisateur (source QinetiQ)	69
Figure 40 : Interface graphique en mode maintenance (source QinetiQ)	70
Figure 41 : Image radar de piste (source QinetiQ)	71
Figure 42 : La résolution angulaire du faisceau radar est 0,18° (source QinetiQ)	71
Figure 43 : Radar et caméra associée (source QinetiQ)	72
Figure 44 : Confirmation par caméra (source QinetiQ)	72
Figure 45 : Zone de détection couverte par un radar et une caméra (source QinetiQ)	72
Figure 46 : Objets situés à 1 km du radar (source QinetiQ)	72
Figure 47 : évolution des performances de détection en fonction de la SER et de l'intensité de pluie [40]	73
Figure 48 : Détecteur caméra sur pylône en treillis (source Stratech)	81
Figure 49 : Tableau relatif aux caractéristiques techniques du système (source Stratech)	81
Figure 50 : Equipements composant le système iFerret (source Stratech)	82
Figure 51 : Disposition unilatérale des détecteurs (source Stratech)	83
Figure 52 : Répartition des zones de surveillance par caméra	83
Figure 53 : Image avant et après traitement par le système iFerret (source Stratech)	84
Figure 54 : Interface graphique du système iFerret (source Stratech)	85
Figure 55 : Système de gestion des situations dégradées par le système iFerret (source Stratech)	86
Figure 56 : Aperçu des objets détectés (source Stratech [32])	89
Figure 57 : Détecteur combiné radar + caméra (source Xsight)	92
Figure 58 : Implantation des détecteurs sur la piste	93
Figure 59 : Positionnement de la bague cassante (source Xsight)	93
Figure 60 : Architecture du système FODetect (source Xsight)	94
Figure 61 : Zone de détection par unité de détection (source Xsight)	95
Figure 62 : Interface principale utilisateur du système FODetect (source Xsight)	96
Figure 63 : Ecran de visualisation des objets détectés (source Xsight)	97
Figure 64 : Images obtenues à partir de mesures radiométriques	119
Figure 65 : Détection d'intrusion en vision panoramique infrarouge	120
Figure 66 : A gauche, une alarme est déclenchée par la présence d'une personne dans une zone de détection. A gauche, image thermique d'une personne détectée par le système	120
Figure 67 : Localisation d'un piéton par caméra reconfigurable	121
Figure 68 : Détecteur laser (source LaserOptronix)	122
Figure 69 : Synoptique de l'installation des détecteurs (source LaserOptronix)	123

Figure 70 : Architecture du système de LaserOptronix (source LaserOptronix)	124
Figure 71 : Images de divers objets données par le détecteur	126

Résumé Exécutif

La présence de débris sur les chaussées aéronautiques est source de dommages directs aux aéronefs et de pertes de capacité pour le trafic aérien. La lutte contre ces débris est aujourd'hui assurée par la réalisation, programmée ou à la demande, d'inspections visuelles des chaussées.

Toutefois, depuis quelques années, l'industrie propose des systèmes de détection automatique de débris sur les pistes d'aérodrome. Ces systèmes reposant sur un système de détection (optique et/ou radar pour les produits existant aujourd'hui) assurent une surveillance continue des pistes et permet d'apporter, au moins théoriquement des possibilités d'amélioration de la lutte contre la présence de débris.

La DSAC a ainsi demandé au STAC de produire une étude exploratoire sur ces systèmes afin d'évaluer leur pertinence et leur maturité. Cette étude doit également permettre d'identifier les critères permettant de juger de leur bénéfice sur le plan de la sécurité.

L'analyse des objets présents sur les pistes d'aérodrome a permis de dresser une première carte des caractéristiques des débris (taille, couleur, matière, origine, localisation, etc.). Cette analyse permet de cibler les objectifs en matière de performances et de fonctionnement pour les systèmes de détection automatique de débris.

Par ailleurs, afin d'évaluer la pertinence de tels systèmes, une analyse de la méthode actuellement employée pour la lutte contre les débris a été réalisée. Elle vise essentiellement à identifier la performance, sur le plan théorique, des inspections visuelles et d'étudier dans quelle mesure les systèmes peuvent présenter une plus-value. Il apparaît notamment que ces systèmes apportent une réelle amélioration dans la lutte contre la présence de débris sur les pistes, sous réserve que la surveillance soit continue et assurée dans les conditions météorologiques et de visibilité pendant lesquels la piste est ouverte au trafic aérien.

L'évaluation de ces systèmes ne serait pas complètement pertinente sans une prise en compte de l'impact de ces systèmes sur l'exploitation aéroportuaire. Il convient en effet de s'assurer que ces systèmes ne conduisent pas à une réduction de la capacité (taux de fausses alarmes, augmentation du nombre de débris détectés, etc.), soient compatibles avec les modes d'exploitation de l'aérodrome et ses équipements, et garantissent une fiabilité acceptable dans des conditions connues (météorologiques, pannes, etc.).

Ainsi trois systèmes ont été identifiés comme répondant aux besoins et contraintes identifiés. Il s'agit des systèmes TARSIER développé par QinetiQ, iFerret développé par Stratech et de FoDetect développé par XSight.

Il est apparu utile de se pencher sur l'utilisation de ces systèmes au-delà de leur objet propre et d'étudier leur possible utilisation dans le cadre de la lutte contre le péril animalier. A ce jour, les systèmes ne semblent pas répondre à la totalité des besoins en détection d'animaux et ne pourraient prétendre à être utilisés à cette fin.

Cette étude permet donc de confirmer l'intérêt que présentent ces systèmes et l'existence de systèmes suffisamment matures pour qu'une utilisation opérationnelle puisse être envisagée. Toutefois, cette étude reste exploratoire, et certains éléments méritent d'être approfondis ou démontrés. Ainsi, les systèmes ont été analysés sur la base des données fournies par les constructeurs et certaines données n'existent pas encore (par exemple, l'évolution du seuil de détection d'un système en fonctionnement par rapport à l'intensité de la pluie. Par ailleurs, compte tenu du peu de données disponibles, la corrélation entre les caractéristiques des débris et les dommages subis par les aéronefs en cas de collision mérite d'être approfondi afin de mieux justifier le choix d'un seuil de détection.

Mots-clés

FOD – objet sur piste – péril animalier – péril aviaire - inspection de l'aire de mouvement – système automatique de détection – QinetiQ – Stratech – LaserOptronix – Xsight – système de détection radar – système de détection optique – système de détection LIDAR

1 Introduction

1.1 Objet du document

La présente étude est réalisée à la demande de la direction de la sécurité de l'aviation civile (anciennement la direction des affaires stratégiques et techniques) de la direction générale de l'aviation civile. Elle vise à connaître la capacité des systèmes existants de détection automatique de débris sur les pistes d'aérodromes (appelés usuellement FOD ou foreign objects and debris), ainsi que d'évaluer leur utilisation possible dans le cadre de la lutte contre le péril animalier.

Cette étude doit notamment permettre d'identifier les possibilités offertes par de tels systèmes, évaluer l'opportunité d'intégrer les possibilités qu'ils offrent dans la réglementation et enfin d'identifier le degré de maturité des produits disponibles sur le marché.

Les phases de décollage et d'atterrissage sont souvent citées comme une des phases les plus critiques du vol des aéronefs au regard de la sécurité. La présence d'objet sur les pistes d'aérodrome entre dans le cas des situations à risque. En effet, la présence d'un objet ou d'un animal sur la piste peut porter atteinte à l'intégrité de l'aéronef et de ses occupants ; elle peut aussi conduire, sans qu'il y ait de dommages directs, à des retards liés à des atterrissages de prudence.

L'amélioration de la sécurité implique que des mesures soient prises afin de limiter la présence de débris, de débris ou d'animaux sur les pistes d'aérodrome. Deux approches sont actuellement mises en œuvre :

- une approche curative : il s'agit de procéder au repérage et au traitement des objets présents sur les pistes ;
- une approche préventive : il s'agit de limiter la probabilité qu'un objet se trouve sur la piste.

Ces deux approches sont aujourd'hui couvertes par la réglementation. Il convient cependant de procéder à une veille permettant de faire évoluer, si nécessaire, la réglementation actuelle. La présente étude s'inscrit dans cette démarche, pour ce qui concerne principalement l'approche curative.

1.2 Guide de lecture

Ce rapport d'étude est articulé en deux parties principales :

- une première partie (chapitres 4 et 5) destinés à établir une grille d'analyse des systèmes de détection (analyse de la réglementation, définition des objectifs en termes de détection, contraintes liées à l'implantation sur un aérodrome) ;
- une seconde partie (chapitres 6 et 7) portant sur la présentation des technologies employées, aux systèmes existants et à leur analyse.

Les termes, acronymes, abréviations et conventions de vocabulaire sont explicitées dans le glossaire disponible en fin de corps de rapport et avant les annexes.

Par ailleurs, les références bibliographiques sont disponibles en fin de corps de rapport.

2 Documentation et références

2.1 Références documentaires

La liste des documents utilisés en référence est fournie à la fin du présent rapport.

2.2 Références des données

Les analyses menées dans le chapitre 4 du rapport reposent sur les notifications d'événement produites par l'aéroport de Paris Charles de Gaulle. Ces notifications d'événement ont été établies dans le cadre de la réglementation sur les reports d'événement (directive européenne 2003/42/CE du Parlement européen et du Conseil du 13 juin 2003 [53]). Ainsi, les données sources sont couvertes par la confidentialité et ne sont pas disponibles dans le présent rapport.

2.3 Référence des termes employés

Le présent rapport comporte un glossaire.

Afin de faciliter la lecture, il apparaît souhaitable que deux termes utilisés fréquemment dans le rapport soient préalablement définis :

- Débris : ce terme est utilisé dans un sens équivalent à celui, anglo-saxon, de foreign objects and debris (littéralement : objets étrangers et débris). Dans le paragraphe 4.2, il est défini de la manière suivante : Sont considérés comme des débris, tout objet inanimé présent sur la chaussée ou ses abords immédiats et dont la présence est inappropriée et inattendue (appelé objet étranger). Ce terme est applicable avec cette définition à partir du paragraphe 4.3.
- Objets : ce terme est employé pour définir les débris ainsi que les animaux présents sur les chaussées ou ses abords immédiats. Il est employés afin d'alléger la lecture du rapport. Ce terme est applicable avec cette définition à partir du paragraphe 4.3.

3 Méthodologie de l'étude

3.1 Analyse du problème, des exigences et hypothèses

Si l'approche préventive évoquée dans le titre 1.1 permet de limiter les probabilités de présence d'objets sur les pistes d'aérodrome, le risque qu'un objet se trouve sur la piste demeure néanmoins et il convient de définir des méthodes de traitement curatif en cas de présence de tels objets.

Cette méthode curative repose sur quatre étapes :

- la détection de la présence d'un objet sur la chaussée ;
- la décision de procéder à son enlèvement par un arrêt des opérations ;
- l'enlèvement proprement dit de l'objet concerné ;
- la remise en service de l'installation.

La réglementation actuelle agrège l'ensemble de ces étapes avec l'organisation d'inspections visuelles périodiques et à la demande. Cependant, si cette méthode est adaptée en fonction des moyens disponibles, elle est améliorable. En effet, les inspections ne conduisent pas systématiquement à la détection d'un objet, et sont de ce fait parfois inutilement consommatrices de capacité. Par ailleurs, elles n'offrent qu'une garantie limitée entre deux inspections. L'optimisation de la méthode passe par une décomposition de ces différentes étapes, en traitant notamment la détection en dehors du processus de traitement de l'objet présent.

Il s'agit donc d'évaluer si les moyens techniques actuels permettent de compléter le système actuel, voire de le remplacer pour ce qui concerne la lutte contre les objets sur les pistes d'aérodrome, en se concentrant sur les systèmes de détection automatique.

Afin de répondre à cette question, le problème peut être décomposé de la manière suivante :

- quelles sont les fonctions essentielles auxquelles les systèmes doivent répondre pour la détection de débris sur les pistes d'aérodrome ?
- quels sont les systèmes existants sur le marché pour la détection de débris ?
- ces systèmes possèdent-ils les fonctions essentielles attendues, pour ce qui concerne la détection de débris ?
- ces systèmes peuvent-ils être utilisés pour la détection d'animaux ?
- ces systèmes peuvent-ils être implantés sur les aérodromes ?

Ces questions constituent les exigences à satisfaire pour répondre à la problématique exposée.

3.2 Approche méthodologique

3.2.1 Points traités dans le cadre de l'étude

Le présent rapport est composé de quatre parties.

La première partie concerne la définition des objectifs de la détection automatique des objets sur les pistes d'aérodrome. Il s'agit ici de définir quelles sont les fonctions que doivent remplir les systèmes pour présenter un intérêt réel et d'identifier les objets qu'il convient de détecter.

Une seconde partie liste l'ensemble des contraintes aéroportuaires applicables. Cette liste permet notamment d'analyser la compatibilité des systèmes avec leur environnement aéroportuaire.

La troisième partie identifie les systèmes qui ont pu être relevés comme susceptibles de permettre la détection des objets étrangers sur les pistes d'aérodrome et possédant les fonctions nécessaires (voir première partie). Des éléments généraux sur les technologies utilisées par les systèmes précités y sont également fournis.

La quatrième et dernière partie fournit une description des systèmes jugés les plus adaptés et propose une analyse de leurs caractéristiques, y compris de la possibilité de les utiliser dans le cadre de la lutte contre le péril animalier.

3.2.2 Limites de l'étude

Conformément à la lettre de commande, la présente étude est basée uniquement sur la documentation collectée. Aucun test, expérimentation ou mesure n'a été réalisé. Ainsi, certaines affirmations exprimées dans ce rapport sont à considérer comme uniquement basées sur des documents et peuvent nécessiter des confirmations par des mesures.

Par ailleurs, l'analyse des systèmes traitée dans la partie 2 du rapport est basée sur la documentation remise par les fabricants des systèmes. Cette documentation est relativement hétérogène et reste générale dans certains cas.

Enfin, l'étude a été réalisée entre le 1er septembre 2006 et le 22 février 2008. Un certain nombre de systèmes a pu être identifié dans ce laps de temps, néanmoins, d'autres systèmes ont pu être développés depuis et ne sont, de ce fait, pas mentionnés ici. Par ailleurs, certains systèmes décrits auront pu être modifiés.

4 Fonction essentielles des systèmes de détection

Cette partie vise à déterminer quelles sont les caractéristiques nécessaires pour que les systèmes apportent une plus-value par rapport aux méthodes actuelles de lutte contre la présence d'objets sur les pistes d'aérodrome. Il s'agit donc de déterminer les performances requises pour de tels systèmes en matière de détection, les fonctions nécessaires et celles, optionnelles, qui présentent un intérêt particulier.

4.1 Relations entre la réglementation actuelle et les systèmes

Afin de limiter les dommages causés aux aéronefs par la présence d'animaux ou d'objets, l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale a mis en place un dispositif de normes et de recommandations qui a été transcrit dans la réglementation française. L'Annexe A au présent rapport présente les différents textes concernés, ainsi qu'une présentation succincte des exigences contenues. Le contenu exact de la réglementation française est disponible sur le site Légifrance (<http://www.legifrance.gouv.fr/>).

On notera notamment que l'objectif poursuivi par la réglementation française vise à limiter les risques de dommage aux aéronefs, dans les deux cas. L'objectif poursuivi est donc à la fois de limiter les risques pour les personnes et de limiter les risques de dommages matériels ; ces deux types de dommages sont corrélés.

4.1.1 Réglementation relative à la lutte contre le péril animalier

La réglementation actuelle relative au péril animalier (décret 2007-432 [15]) impose aux exploitants d'aérodrome (article D. 213-1-19 du code de l'aviation civile), aux équipages d'aéronefs (Article D. 213-1-22 du code de l'aviation civile) et aux services chargés de la circulation aérienne (article D. 213-1-20 du code de l'aviation civile) de signaler toute présence d'oiseaux, l'exploitant d'aérodrome étant chargé de procéder à leur effarouchement.

Cependant cette réglementation ne préconise aucune méthode de détection systématique ; celle-ci repose essentiellement sur l'attention de chaque acteur.

4.1.2 Réglementation relative aux inspections de l'aire de mouvement

Pour ce qui concerne la lutte contre les objets étrangers sur les pistes, la gestion de ceux-ci est couverte par la mise en place d'inspections visuelles dont la fréquence varie en fonction du trafic accueilli.

Il convient de souligner que ces inspections visuelles ne sont pas limitées à la seule détection des objets étrangers et leur enlèvement, mais vise aussi à s'assurer de l'état global de la piste (détérioration visible de la chaussée, état du balisage, présence de neige ou d'accumulation d'eau, etc.).

Cependant, cette méthode de détection comporte plusieurs éléments limitatifs. Ainsi qu'on le verra plus loin, ces inspections permettent toutefois de détecter la grande majorité des débris (environ 4 sur 5).

4.1.2.1 Les inspections sont réalisées par des agents

L'efficacité de ces inspections dépend de l'attention des agents chargés de réaliser l'inspection, de leur expérience, de leur acuité visuelle, de la vitesse à laquelle est pratiquée l'inspection, de la visibilité de l'objet (qui peut être masqué par la végétation lorsqu'il se trouve dans la bande aménagée par exemple), etc.

La détection des objets étrangers sur les pistes d'aérodrome dépend ainsi de la qualité de l'inspection et des inspecteurs.

4.1.2.2 Les inspections sont réalisées piste fermée

Les inspections sont assurées par des agents circulant à bord d'un véhicule, et la sécurité impose que le trafic aérien soit suspendu le temps de l'intervention.

A titre d'illustration, sur l'aérodrome de Paris Charles de Gaulle, la durée d'une inspection est de l'ordre de 10 à 15 minutes pendant lesquelles aucun aéronef ne peut atterrir ou décoller.

Les inspections impliquent des pertes de capacité corrélées avec le nombre d'inspections. Cette perte de capacité affecte plus particulièrement les aérodromes à très fort trafic.

4.1.2.3 Les inspections sont visuelles

L'efficacité des inspections dépend de la visibilité au moment de l'inspection (nuit, brouillard, pluie, neige, ciel nuageux, etc.) ; un facteur supplémentaire à prendre en compte concerne les inspections qui peuvent être annulées pendant les opérations aériennes en condition de basse visibilité (LVP) pour des raisons de sécurité.

La probabilité de détection lors des inspections visuelles est d'autant plus faible que la visibilité est réduite.

4.1.2.4 Les inspections sont ponctuelles

Entre deux inspections visuelles, de nouveaux débris peuvent apparaître sur la chaussée. Ainsi, entre deux inspections, des opérations aériennes peuvent avoir lieu malgré la présence d'objet.

La réglementation actuelle prévoit outre ces inspections programmées, des inspections réalisées à la demande, notamment après qu'un pilote d'aéronef ait signalé la présence d'un débris ou qu'un incident ait eu lieu (éclatement d'un pneu par exemple).

4.1.2.5 Conclusions sur les limites de la réglementation relative aux inspections visuelles de piste

Le système actuel découle d'un équilibre entre la nécessité de réaliser des inspections fréquentes et celle de maintenir la régularité du trafic aérien. On notera plus loin dans ce chapitre, notamment, que la probabilité de présence de débris est d'autant plus importante que le trafic est dense. Ainsi, il conviendrait d'augmenter la fréquence de ces inspections à mesure que le trafic s'élève, or c'est dans ce cas que ces inspections ont l'impact le plus négatif sur les opérations aériennes.

De manière connexe, en fonction de la structure du trafic, un nombre plus important d'inspections peut devoir être réalisé. En effet, la réglementation sur les inspections de l'aire de mouvement [14] a évolué récemment et prévoit, selon le trafic de la piste, au moins 3 inspections par jour avec une durée minimale de 5 heures entre deux inspections.

Il apparaît ainsi que la méthode des inspections visuelles présente une limite et que le nombre d'inspections ne pourra augmenter indéfiniment ; cette limite est d'autant plus marquée que le trafic sur les aérodromes concernés est important. Il est donc nécessaire de trouver de nouvelles méthodes de lutte contre la présence d'objet sur les pistes d'aérodrome.

4.1.3 Conclusion

La réglementation actuelle répond aux objectifs de sécurité de la lutte contre le péril animalier et contre la présence de débris par la mise en place d'un système principalement visuel. Cependant la recherche d'une amélioration de la sécurité imposera de changer de méthode à terme. En effet, le nombre d'inspections ne peut pas être indéfiniment augmenté et il est difficile d'améliorer la vision des inspecteurs en condition de visibilité réduite.

Afin d'apporter une avancée significative en matière de sécurité, les nouvelles méthodes de lutte contre la présence d'objets sur les pistes reposent donc sur les caractéristiques suivantes :

- la détection doit être permanente ;
- la détection doit se faire avec le minimum d'interaction avec les opérations de piste ;
- la détection doit se faire quelle que soit la visibilité.

4.2 Définition des objets

Avant de poursuivre plus avant, il est nécessaire de préciser ce que sont les objets concernés dans l'étude. Ils sont de deux natures :

- les objets inanimés susceptibles d'être présents sur les pistes ; ils seront appelés dans le reste de l'étude « débris » ;
- les animaux, objets animés de leur propre volonté susceptibles d'être présent sur les pistes ou au-dessus.

Dans la suite de l'étude, le terme d'objet concerne tant les débris que les animaux.

4.2.1 Les « débris »

Il n'existe pas de définition standardisée de ce que sont les débris (appelés en anglais : foreign objects and debris ou FOD). Il est proposé de retenir la définition suivante dans le cadre de l'étude :

« Objet inanimé présent sur la chaussée ou ses abords immédiats et dont la présence est inappropriée et inattendue ».

En effet, plusieurs types d'objets inanimés peuvent être présents sur la chaussée ou ses abords :

- des équipements d'aide à la navigation aérienne qui présentent une utilité pour l'exploitation de la piste et pour les opérations aériennes ; ces équipements ne peuvent pas être considérés comme des objets inappropriés et leur présence est connue (ou attendue) ; tel est le cas notamment des équipements de radionavigation, du balisage lumineux ou des panneaux de signalisation ;
- d'anciens équipements désaffectés dont la présence est désormais inappropriée, mais dont la présence est connue ; ces objets sont généralement considérés comme des obstacles et ne sont pas considérés comme des débris ; tel est le cas par exemple d'un support en béton d'un ancien équipement d'aide à la navigation aérienne, et qui au fur et à mesure du temps émerge du sol ;
- des objets oubliés sur la chaussée, tombés d'un véhicule, amenés par le vent ou provenant d'un aéronef ; ces objets n'ont aucune fonction dans l'exploitation de la chaussée et dans les opérations aériennes ; ainsi leur présence ne peut être considérée ni comme appropriée, ni comme prévue, ils sont alors considérés comme des débris.

Quelques exemples de débris (figure 1 à figure 4) :

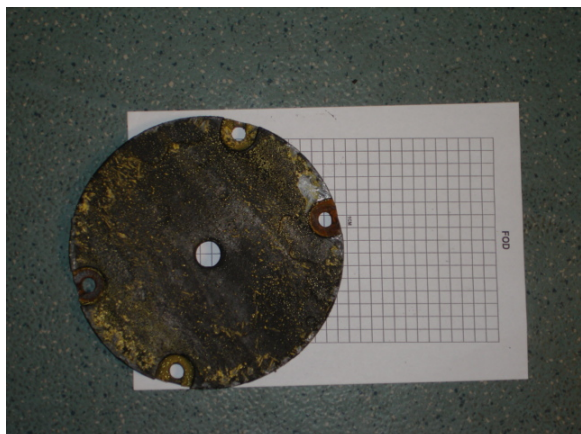


Figure 1 : Bouchon de feu encastré (source ADP)



Figure 2 : Bouchon de réservoir d'avion (source ADP)



Figure 3 : Lame métallique – origine inconnue (source ADP)



Figure 4 : Morceau de pneu d'aéronef (source ADP)

Un cas particulier concerne les animaux morts sur la chaussée. Ces derniers peuvent provenir de collisions non détectées entre un aéronef et un animal, d'une blessure mortelle chez l'animal pris dans les tourbillons atmosphériques dus au passage d'un aéronef, d'un animal écrasé par l'aéronef, etc. Ils peuvent moins constituer un danger en eux-mêmes (à condition que leur masse soit réduite) mais peuvent plus présenter un risque lié à l'attraction qu'ils peuvent provoquer chez des animaux vivants, introduisant de ce fait un risque animalier particulier.

Les animaux morts sont considérés comme des débris dans la présente étude dans la mesure où ils répondent à la définition.

On pourra également noter que la méthode de lutte contre les animaux morts est identique à celle contre les débris. L'intégration des animaux morts dans les débris présente donc également une cohérence par rapport aux moyens à mettre en œuvre pour lutter contre leur présence.

4.2.2 Les animaux

Les animaux regroupent les oiseaux et les animaux se mouvant au sol ou en l'air. Les risques liés aux oiseaux sont principalement liés à une collision en vol, alors que les animaux au sol constituent plus un risque d'ingestion ou de collision entre les parties basses de l'aéronef et l'animal.

Le terme est suffisamment explicite et ne nécessite pas d'être défini.

4.2.3 Conclusion

Le terme de débris est défini de la manière suivante « Objet inanimé présent sur la chaussée ou ses abords immédiats et dont la présence est inappropriée et inattendue ». Cette définition intègre les animaux morts.

Sont considérés comme des objets, tout objet inanimé présent sur la chaussée ou ses abords immédiats et dont la présence est inappropriée et inattendue (appelé débris), ainsi que les animaux présents sur la chaussée et ses abords immédiats.

4.3 Zone de détection des objets

L'objectif poursuivi par la réglementation est la suppression des risques liés à la présence d'un objet sur la piste de l'aérodrome pendant les opérations de décollage et d'atterrissage. Il est ainsi évident que sont concernés en premier lieu les objets sur la piste elle-même. Cependant, des objets présents à proximité de la chaussée peuvent également interagir avec l'aéronef. Il convient dès lors d'identifier les différentes zones où la présence d'un objet peut induire un risque et où une détection assurée par des systèmes de détection automatique apparaît essentielle.

Les interactions entre l'aéronef et un objet sont de plusieurs ordres.

4.3.1 Les collisions directes

Les dommages causés à l'aéronef peuvent être dus à une interaction directe entre l'aéronef et l'objet : choc entre le train de l'aéronef et l'objet si celui-ci est au sol, ou choc entre l'ensemble de l'aéronef et l'objet s'il s'agit d'un oiseau.

Ainsi, si l'on considère les débris, la zone à surveiller est la piste, le train de l'aéronef pouvant se situer n'importe où dans cette zone.

Par contre, si l'on considère les animaux, il faut tenir compte de leur déplacement. Dans ce cas, la zone à surveiller est bien plus étendue et prend en compte la vitesse de déplacement de l'animal. En tenant compte d'une vitesse de l'ordre de 100 km/h (vitesse du chevreuil ou de quelques oiseaux présents sur les aérodromes français), la zone à surveiller est de l'ordre de 30 mètres si l'on souhaite détecter l'animal 1 seconde avant qu'il ne croise la piste. Ainsi, la surveillance d'une bande de 150 mètres de demi-largeur permet une anticipation de 5 secondes dans le cas d'un chevreuil et de 15 secondes dans le cas d'un lapin. Ce délai est particulièrement court, surtout si un appareil est en phase de décollage au moment où l'animal est détecté.

4.3.2 Les collisions par aspiration

Les dommages peuvent être causés au moteur de l'aéronef suite à l'ingestion d'un objet : passage du moteur à proximité de l'objet. Ce type de dommage touche principalement les aéronefs dotés de réacteurs.

Considérant que la piste est dotée d'accotements pour réduire les risques liés à l'aspiration d'un objet par le moteur, la zone à surveiller correspond à la largeur de piste et ses accotements.

Dans le cas d'un animal, la zone à surveiller correspond à celle identifiée pour les collisions directes : la bande de piste.

4.3.3 Les collisions par projection

Enfin, l'interaction peut être une projection de l'objet par un moteur ou le train de l'aéronef. Ce genre d'interaction peut provoquer une collision directe entre l'objet et l'aéronef.

Ici encore, la position du moteur détermine le champ de la détection. La zone de détection est donc la piste et ses accotements pour les débris.

Pour ce qui concerne les animaux, la bande de piste fait aussi partie de la zone minimale à surveiller.

4.3.4 Cas des prolongements d'arrêt

Les aéronefs peuvent être amenés à emprunter exceptionnellement les prolongements d'arrêt de la piste. Néanmoins, dans une telle situation, l'aéronef se trouve à vitesse réduite et les risques apparaissent limités.

De plus, ces prolongements d'arrêt sont rarement empruntés par les aéronefs, de ce fait, les probabilités d'interaction entre un aéronef et un objet sont plus réduites que sur la piste.

L'intégration des prolongements d'arrêt dans la zone à surveiller par un système automatique n'apparaît pas critique, aussi il n'apparaît pas indispensable que la surveillance de cette zone soit exigée, les inspections visuelles pouvant s'avérer suffisantes pour couvrir le risque.

4.3.5 Cas des seuils décalés

Les aéronefs peuvent utiliser les zones de piste en amont d'un seuil décalé pour initialiser une manœuvre de décollage ou terminer une manœuvre de décollage ou d'atterrissage.

Si les risques d'interaction entre l'aéronef et un objet pendant les phases d'initialisation du décollage ou d'achèvement d'atterrissage ne sont pas nuls (par exemple : possibilités de projection d'objets par le souffle des réacteurs sur les parties arrières existent), ils n'apparaissent pas critiques, l'aéronef étant à vitesse réduite. En revanche, le risque apparaît beaucoup plus important en phase finale de décollage et implique que ces zones soient à surveiller.

4.3.6 Conclusions

Pour ce qui concerne la lutte contre les risques liés à la présence de débris sur les pistes, les zones de détection sont la piste (les zones en amont des seuils décalés comprises) et les accotements de piste.

Pour ce qui concerne la lutte contre le péril animalier, les zones de détection sont la piste, les zones en amont des seuils décalés comprises, les accotements de la piste et la bande. Il est possible, de retenir un objectif de protection plus limité en n'assurant pas la surveillance de la bande, considérant que la détection des animaux posés sur la piste et ses accotements présente un premier niveau de protection.

4.4 Les types d'objets présents sur les pistes d'aérodrome

4.4.1 Les débris

Il n'existe pas de base de données centralisée permettant une connaissance exhaustive des débris collectés sur les pistes d'aérodrome.

Il a été retenu de recourir aux données qu'Aéroport de Paris recueille depuis 2005 sur l'aérodrome de Paris Charles de Gaulle. En effet, en prévision de la mise en place de la réglementation sur les systèmes de gestion de la sécurité, l'exploitant de l'aérodrome a produit pour chaque objet collecté, une fiche de recueil d'événement (fiche de notification d'événement) où sont indiqués l'objet collecté, sa position dans la mesure du possible, la date, sa provenance si possible et ses dimensions. Ces fiches ont permis de constituer une première base de données exploitable, permettant de faire une analyse préliminaire des débris susceptibles d'être présents sur les pistes d'aérodrome.

Entre juin 2005 et juillet 2007, un ensemble de 170 objets ont ainsi fait l'objet d'une fiche de recueil d'événement par l'exploitant de l'aérodrome.

- leur position ;
- leur provenance ;
- leur taille ;
- leurs couleurs ;
- leur matière constitutive.

4.4.1.1 Position des débris sur les pistes d'aérodrome

↳ Analyse des données

Diagrama de la secció transversal d'una carretera de doble sentit amb quatre zones de treball. La carretera té una pista central i accotaments a cada costat. Les zones de treball són: Zona 1 (a l'extrem esquerre), Zona 2, Zona 3 i Zona 4 (al centre, sobre la pista). Les zones 1 i 2 són a l'extrem esquerre, les zones 3 i 4 són al centre, i les zones 2 i 1 són a l'extrem dret. Les zones 1 i 2 són a l'extrem esquerre, les zones 3 i 4 són al centre, i les zones 2 i 1 són a l'extrem dret. Les zones 1 i 2 són a l'extrem esquerre, les zones 3 i 4 són al centre, i les zones 2 i 1 són a l'extrem dret.

L'analyse de la localisation permet d'établir la répartition spatiale des objets collectés :



Figure 6 : Représentation de la répartition des débris collectés par zone

On peut noter (figure 6) que les objets sont uniformément répartis sur les pistes à l'exception des seuils où une part moindre, mais non négligeable, de débris a été ramassée.

La présence d'objets dans les accotements et au-delà est très limitée.

Cependant, pour ce qui concerne les accotements, le pourcentage est à ramener par unité de surface (rapport de 1 à 6 par rapport à la même longueur de piste), et dans ce cas, les fréquences de présence d'objets sont assez proches.

Enfin, pour ce qui concerne les objets au-delà des accotements, le faible pourcentage peut être expliqué par la présence d'herbe, qui rend plus difficile le repérage par les agents chargés des inspections.

🔗 Conclusion

La détection devrait être assurée sur la totalité de la piste et de ses accotements, aucune section longitudinale en particulier n'étant à privilégier.

4.4.1.2 Analyse de la provenance des objets

Cette analyse vise à déterminer la provenance des objets : piste (morceaux de chaussée), balisage, matériel (outillage de maintenance, équipements vestimentaires, etc.), avion, etc.

L'objectif de cette analyse est de déterminer les périodes où la probabilité de présence d'un objet sur la piste est la plus élevée et si des mesures simples d'exploitation peuvent permettre de réduire cette probabilité. Par exemple, si la majeure partie des objets sont des pièces de balisage, une analyse de la résistance du balisage à la fatigue, au souffle des réacteurs, de leur positionnement, etc., peut permettre, avec d'éventuelles mesures correctives (choix d'un autre modèle de balise dans l'exemple), de réduire le nombre d'objets.

Note importante : cette provenance n'est en aucun cas à lier à la cause de la présence d'un objet. Par exemple, la présence sur la piste d'un feu de balisage peut trouver sa cause soit dans un défaut d'entretien de la piste, soit dans le caractère défaillant de la pièce elle-même, soit être due au passage d'un aéronef sur le feu. Les données ne permettent en aucun cas de déterminer la cause de la présence d'un objet.

🔗 Analyse des données

104 fiches permettent de déterminer la provenance de l'objet trouvé sur la piste. Cette provenance a été déterminée selon les catégories suivantes :

- avion, lorsqu'il s'agit d'une pièce appartenant à un aéronef ;
- piste, lorsqu'il s'agit d'un objet provenant de la chaussée elle-même ;
- balisage, lorsqu'il s'agit d'un élément de balisage (lumineux ou panneau) ;
- oiseau, lorsqu'il s'agit d'un oiseau mort ;
- environnement, lorsque l'objet peut provenir de l'environnement de la piste (par exemple, un sac plastique amené par le vent) ;
- matériel, lorsque l'objet est un outil ;
- inconnue lorsque la provenance de l'objet n'a pu être établie.

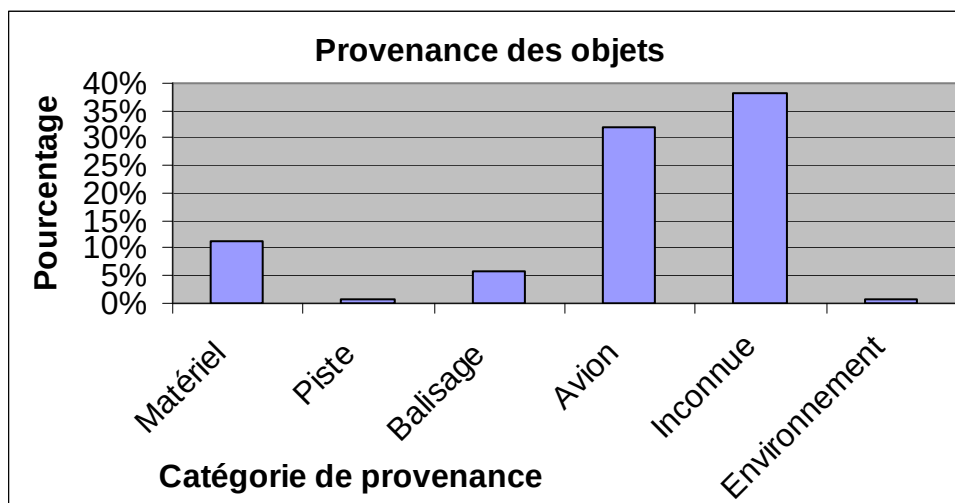


Figure 7 : Graphique représentant la provenance des objets

Les données relatives aux animaux morts ramassés sur les pistes n'ont pas été demandées sur l'intégralité de la période, aussi, n'ont-elles pas été introduites dans ce graphique. Des données agrégées ont été fournies par Aéroports de Paris. Ces données ont permis de noter que les animaux morts collectés sur la piste représentaient un nombre équivalent à celui des débris.

La première source de débris sur les pistes sont les aéronefs eux mêmes.

Les éléments de balisage et les matériels perdus constituent la seconde source d'objets. A noter qu'une part des matériels trouvés sur la piste correspond à des outils de maintenance d'aéronefs, aussi, une part de ces matériels pourrait être classée dans la catégorie aéronef (une analyse basée sur les types de matériels –miroir d'inspection, pinceau de graissage, etc.- montre que cela ne devrait pas représenter plus de 25% de ces matériels).

On peut noter la part importante d'objet dont l'origine n'a pas pu être déterminée (boulons, morceaux métalliques, etc.). Certains d'entre eux, d'origine non aéronautique, semblent provenir d'éléments apportés par les aéronefs (éléments coincés dans le pneu d'un aéronef à l'atterrissage par exemple).

Dans la mesure où une part importante des objets provient des appareils eux-mêmes, il convient de considérer qu'un objet est susceptible d'apparaître après le décollage ou l'atterrissage d'un aéronef.

🔗 Conclusion

Il est retenu que les appareils de détection assurent une détection permanente, et que la période de balayage de la zone à surveiller devrait se rapprocher le plus possible du rythme des décollages et des atterrissages (en d'autres termes, que le système puisse assurer une vérification de la piste entre chaque mouvement d'aéronef).

4.4.1.3 Analyse de la dimension des objets

Théoriquement, les systèmes de détection ont un seuil à partir duquel la détection devient possible. Dans la réalité, cette détection dépend de la nature de l'objet, de sa couleur (contraste par rapport au fond), de sa forme, de l'angle qu'il forme avec le détecteur et de sa matière. Ces paramètres ont plus ou moins d'influence selon la technologie étudiée.

Ainsi, cette analyse ne permet pas de mesurer la répartition d'objets détectés par les systèmes, mais vise à fournir une idée des objets qui peuvent être trouvés sur les chaussées et avoir une idée de la difficulté à les détecter.

📌 **Note liminaire sur la taille et le risque**

Le risque de dommages important dus à la présence d'un débris sur une piste d'aérodrome est principalement lié à l'énergie dégagée au moment de l'impact. Cela signifie que plus un débris est lourd et compact, plus le risque est important. Par exemple, un objet de 10cm³ en acier n'aura pas le même impact qu'un objet du même volume mais en polystyrène. De même la vitesse au moment de l'impact (qu'il s'agisse de la vitesse de l'aéronef qui vient percuter l'objet ou la vitesse de l'objet éventuellement projeté par le souffle d'un réacteur) joue un rôle important.

Toutefois, les méthodes de détection à distance déployées dans le cadre des systèmes de détection automatique ne permettent pas de mesurer la matière constitutive de l'objet, sa vitesse relative ou sa compacité. Il n'est donc pas possible de corrélérer directement le risque et l'objet.

Une manière approchée de considérer le risque lié à l'objet est de mesurer sa taille, ce que permettent de faire beaucoup plus aisément les systèmes (avec une approximation pour les systèmes qui seraient uniquement basés sur des radars qui ne mesurent que la surface équivalente radar). Il est ainsi retenu que le critère de taille serait le facteur approchant du risque.

📌 **Analyse des données**

La très grande majorité des fiches comportent des photos avec une échelle permettant d'apprécier globalement les dimensions des objets présents sur les pistes d'aérodrome.

Il a été retenu dans le cadre de l'étude de caractériser les objets par les dimensions qu'ils peuvent prendre plutôt que par leurs sections géométriques ou équivalentes (section géométrique corrigée en fonction de l'homogénéité de l'objet), bien plus compliquées et aléatoires à déterminer. Par ailleurs, les fabricants fournissant une dimension et non une section géométrique ou une section équivalente, un tel calcul se serait avéré inutilisable pour évaluer les systèmes.

Dans la mesure où les systèmes observent la piste selon un angle, dans le plan vertical, très faible (inférieur à 4%), la contribution de la section horizontale à la détection est particulièrement réduite. Il est choisi d'analyser la dimension des objets selon leur face verticale.

Les objets ont été pris dans la position qui semble la plus stable (posés à plat).

Les deux (figure 8 et figure 9) donnent une répartition de la hauteur des objets et la répartition de la section verticale des objets.

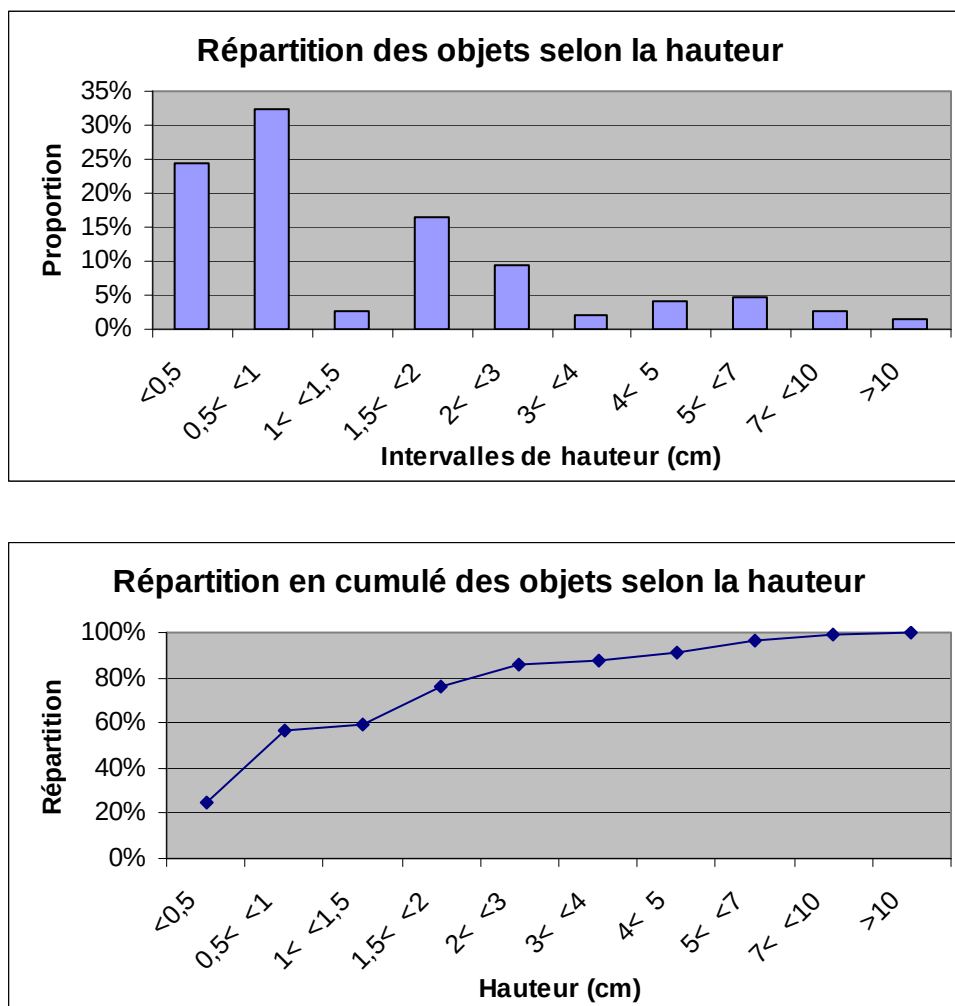


Figure 8 : Graphiques représentant la répartition des objets selon leur hauteur

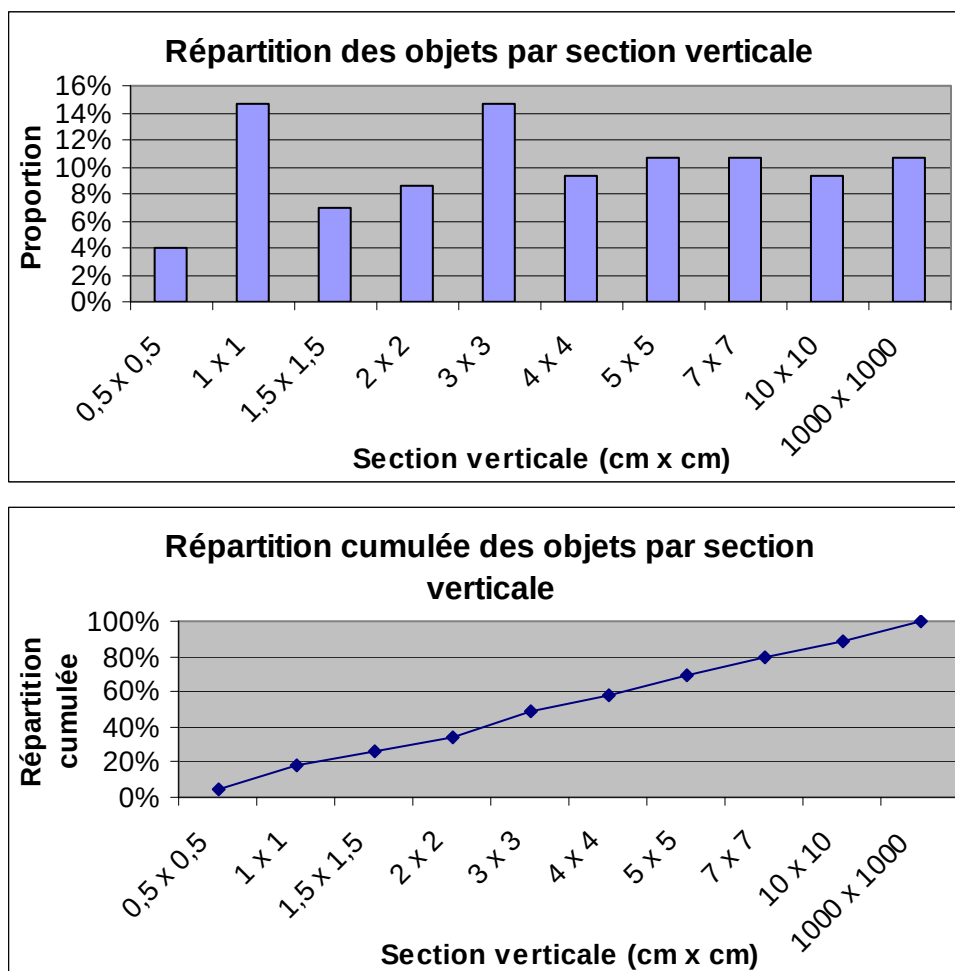


Figure 9 : Graphiques représentant la répartition des objets selon leur section verticale

Conclusion

L'analyse montre qu'une très grande majorité des objets possède une épaisseur comprise entre 5 mm et 2 cm. Les autres objets sont bien moins nombreux. Lorsque l'on s'intéresse à la section verticale, on peut constater une répartition beaucoup plus homogène avec environ 30% d'objets ayant une section inférieure à 2 cm x 2 cm.

Une analyse de corrélation entre le danger que représentent ces objets d'une hauteur inférieure à 2 cm est à faire. En effet, il n'existe pas de base de données suffisamment riche et détaillée permettant d'évaluer rigoureusement l'impact de la taille d'un objet avec le danger qu'il représente. Un choix de 2 cm peut être proposé actuellement. Il résulte de la prise en compte des points suivants :

- la taille des objets à détecter ne peut être inférieure à celle des gravillons que l'on peut trouver sur les chaussées, au risque de déclencher des alarmes intempestives ;
- une taille supérieure à 2 cm apparaît présenter des risques pour les aéronefs dans une évaluation qualitative ;

Néanmoins, on peut noter que la lamelle impliquée dans l'accident du Concorde a une épaisseur inférieure à 5 mm.

En l'état actuel des connaissances, il est proposé de retenir un seuil de détection de deux centimètres. Ce seuil sera à faire évoluer dans les cas suivants :

- lorsque la corrélation entre la taille d'un objet et les risques en cas de collision avec un aéronef seront mieux connus ;
- lorsque les performances des systèmes et l'expérience acquise permettront de diminuer le seuil de détection.

4.4.1.4 Analyse de la couleur des objets

L'analyse de la couleur intéresse plus les systèmes reposant sur une technologie de détection optique. La détection d'un objet dans l'image étant assurée par des comparaisons de pixels, l'important est en réalité le contraste. Ainsi, il convient de comparer les couleurs analysées ici avec la couleur des pistes (gris ou noir selon le type de chaussée) et la couleur du balisage (blanc principalement).

📁 Analyse des données

Les photos fournies dans les fiches permettent d'avoir une idée approximative de la couleur des objets. Cependant certains objets sont de plusieurs couleurs, et il a été retenu, pour ces objets, de prendre les deux couleurs principales des objets. Par exemple, pour l'objet suivant deux couleurs ont été retenues :

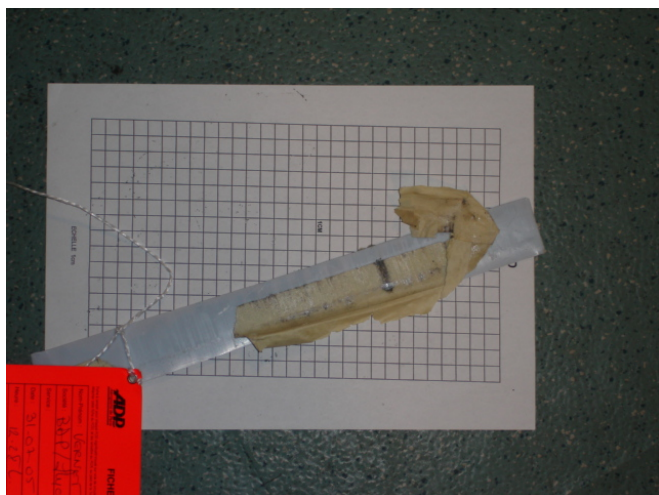


Figure 10 : Première face (photo : source ADP)

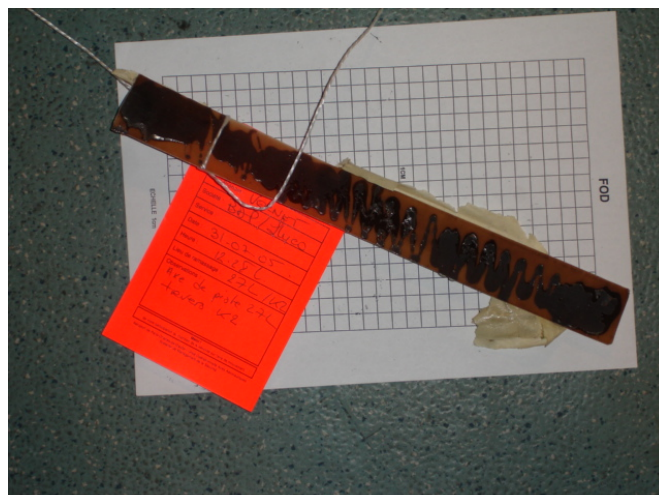


Figure 11 : Seconde face (photo : source ADP)

L'analyse statistique des couleurs des objets permet de dresser le graphique suivant (figure 12) :

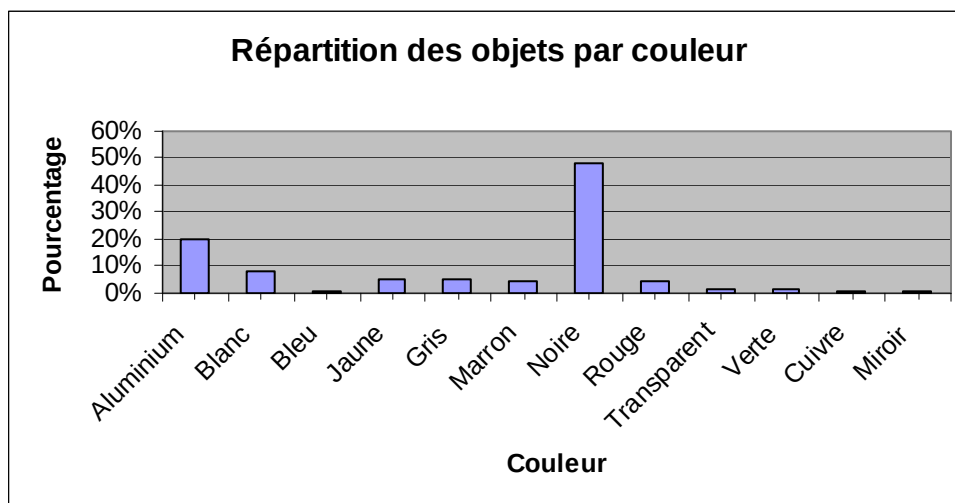


Figure 12 : Répartition des objets par couleur

Conclusion

La majorité des objets présents sur les pistes d'aérodrome a une couleur dans les teintes noires, grises ou blanches susceptibles de présenter des difficultés de contraste avec la couleur de la chaussée. Par ailleurs, les teintes aluminium représentent des objets dont la surface est réfléchissante. Ces deux phénomènes peuvent ainsi potentiellement présenter des difficultés de détection pour les différents systèmes suivant leur principe de fonctionnement.

4.4.1.5 Analyse de la matière constitutive des objets

Cette analyse a principalement pour but de déterminer la matière dont les objets sont constitués. En effet, de la même manière que la couleur, certaines technologies peuvent éprouver plus de difficultés à détecter certaines matières.

Analyse des données

Les fiches permettent pour la plupart de supposer la matière principale de l'objet, c'est à dire la matière dont l'objet est principalement constitué en volume extérieure¹.

Afin de permettre une lecture aisée, seulement 10 types de matières ont été retenus pour classer les objets : les matières constituant la chaussée (bitume), le bois, le carbone (un frein de disque), le cuir et le tissu, le plastique, le verre et enfin le métal. Les matières organiques ne sont pas à oublier ; elles représentent autant en quantité que les autres débris.

La répartition est la suivante :

¹ Les systèmes de détection utilisés recourent aux ondes millimétriques qui ne pénètrent pas le matériau en profondeur. Ainsi, la couche de surface est la plus importante pour la détection.

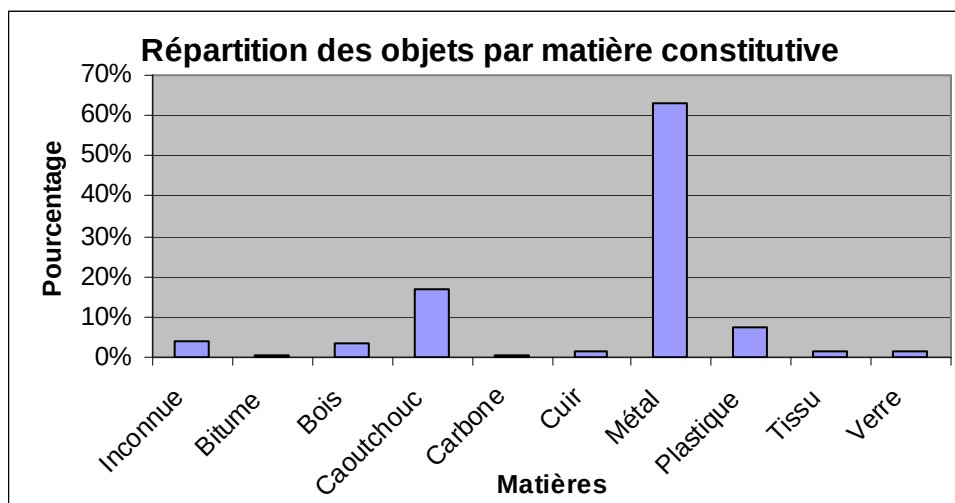


Figure 13 : Répartition des objets par matière constitutive

On peut noter que les pièces ramassées sur les pistes sont pour l'essentiel des pièces métalliques, matière présentant les risques de dommages les plus importants.

Enfin, les objets en caoutchouc concernent principalement les morceaux de pneus présents sur la chaussée. Ils constituent l'intégralité des objets en caoutchouc.

↳ Conclusion

Outre les matières organiques, les objets collectés sur les pistes sont principalement constitués de métal et de caoutchouc.

4.4.1.6 Contexte de la collecte des débris

↳ Analyse des données

165 fiches donnent l'information sur le contexte de la collecte des débris : lors d'une inspection programmée ou lors d'une inspection réalisée à la demande (d'un pilote, de la tour de contrôle).

On peut constater que dans 76% des cas, le débris a été collecté lors d'une inspection programmée et que dans seulement 24% des cas, le débris a été collecté à la demande d'un tiers (tour de contrôle, pilote).

On peut noter que sur l'aéroport de Paris Charles de Gaulle, trois inspections sont réalisées par jour.

↳ Conclusion

Le fait que dans $\frac{3}{4}$ des cas, le débris a été collecté à l'occasion d'une inspection programmée permet de mettre en évidence la pertinence de la méthode actuelle. Cette information vient atténuer la pertinence de disposer d'un système de détection continu. Toutefois, on peut raisonnablement estimer que les débris collectés sur les pistes ne représentent qu'une part des débris réellement présents sur les pistes. En effet, en fonction de leur masse, certains débris peuvent être soufflés par le vent ou par les réacteurs des aéronefs et sont de ce fait projetés dans l'herbe de la bande où ils sont moins bien détectés.

4.4.1.7 Conclusions

Les données obtenues d'Aéroports de Paris permettent de dégager des tendances, cependant, elles restent limitées à un aérodrome et auraient mérité d'être complétées par d'autres données sur des aérodromes de

types différents. Il n'est pas possible de déterminer des objectifs de détection précis et sûrs pour les objets à détecter, ceux-ci étant donc pour le moment recommandés.

Un croisement des paramètres n'a pas été effectué dans la mesure où la taille de l'échantillon ne permet pas de dégager des populations d'une taille statistiquement acceptable. Une analyse de corrélation entre la taille des objets et leur matière constitutive pourrait permettre de dégager un seuil plus fiable.

Il est nécessaire de procéder à une collecte plus large et plus exhaustive pour caractériser les objets à détecter. Ce travail permettra à la fois de déterminer les objets qu'il convient de détecter et de participer à la conception des aéronefs en donnant des objectifs de résistance aux impacts des différents éléments des aéronefs. La réglementation sur les reports d'incidents entrée en vigueur récemment aidera à la collecte des données nécessaires.

4.4.2 Les animaux

L'étude vise, entre autres, à évaluer la capacité des systèmes à participer à la lutte contre le péril animalier en assurant une détection des animaux. Dans la mesure où il n'existe pas de base de données permettant de traiter les oiseaux simultanément avec les autres animaux, il a été retenu d'utiliser la base de données PICA entretenue par le STAC qui est particulièrement riche, et de demander au BEA la liste des événements où un animal autre qu'un oiseau a été impliqué.

4.4.2.1 Analyse des données sur les oiseaux.

La base de données PICA (Programme d'Informations sur les Collisions Aviaires) est constituée à partir des comptes rendus de rencontres d'oiseaux, fournis par les pilotes, les autorités aéroportuaires et les ateliers d'entretien des avions. Les données détaillées, collectées par le STAC, s'échelonnent entre les années 2001 et 2005. Elles comportent des informations sur la ou les espèces ornithologiques, entrées en collision avec un aéronef, la nature des dommages causés par cette collision ainsi que les conséquences sur le vol de l'aéronef.

Dans l'analyse de ces données, il s'est agi, dans un premier temps, de transposer les données concernant les oiseaux, à savoir l'espèce ornithologique en un paramètre quantifiable. Les données précises sur l'espèce ont permis d'extraire trois paramètres mesurables :

- la taille de l'oiseau mis en cause ;
- son envergure ;
- sa masse.

La nature des dommages, ainsi que les conséquences sur le vol de l'aéronef percuté, permet de qualifier ces données selon deux types d'événements :

- les événements sérieux correspondant aux événements ayant pour conséquence la mise en jeu de l'intégrité de l'aéronef ainsi qu'un risque avéré pour la sécurité des passagers ; parmi ces conséquences figurent aussi les modifications de l'exploitation de l'aéronef (atterrissage de prudence, décollage interrompu, retard, annulation de vol et accident) ;
- la deuxième catégorie d'événement représentant les événements significatifs qui correspondent aux cas où la collision n'a eu que peu de conséquence sur le vol (principalement les cas où après le vol, de simples traces de l'impact de l'oiseau ont été relevées).

Après ce traitement de données et cette distinction entre événements, une évaluation des événements sérieux et significatifs en fonction des trois paramètres définis plus haut (à savoir la taille, la masse, l'envergure des oiseaux) a été menée.

Cette évaluation est résumée dans les graphiques suivants (figure 14 à figure 17).

📍 Analyse selon la taille de l'oiseau

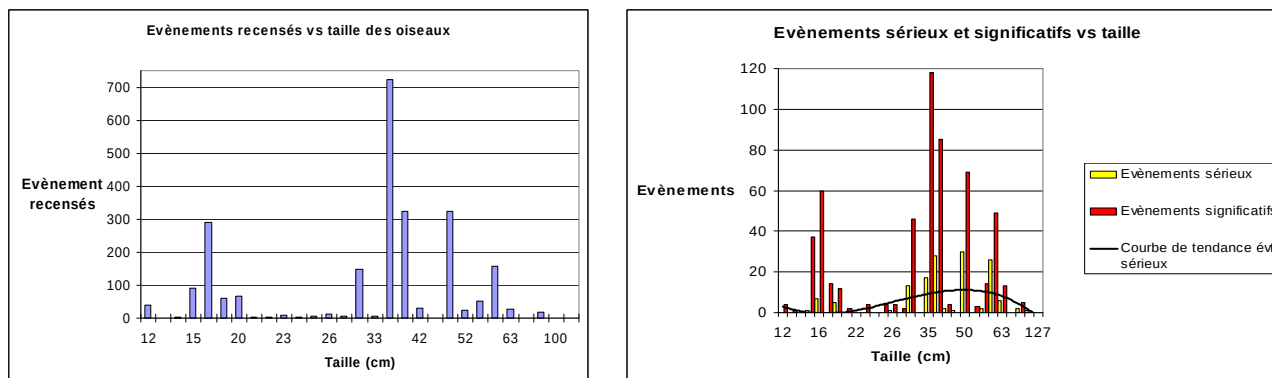


Figure 14 : Nombre d'événements en fonction de la taille de l'oiseau et du type d'événement

Le paramètre ici étant la taille des oiseaux, on peut noter que tous les événements pris en compte (événements recensés, graphique de gauche) présente la même distribution en fonction de la taille que les événements sérieux ou significatifs, traités séparément (graphique de droite). Ce qui confère à la base de données une cohérence dans la collecte des informations.

On peut noter deux pics de fréquence d'incident/accident. Le premier concerne des oiseaux de petite taille et le second des oiseaux de taille plus forte. En fait, le premier pic est dû aux événements où la taille de l'oiseau percuté n'est pas le facteur d'incident ou d'accident, mais le nombre d'individus percutés. Le second pic correspond quant à lui aux cas où un seul individu suffit à causer l'incident ou l'accident.

La majorité des événements sérieux se regroupent dans un intervalle de taille d'oiseaux s'étalant de 30 cm à 100 cm.

Cependant, les premiers événements commencent avec le premier pic et il est proposé de déterminer la valeur du seuil à partir du premier pic de fréquence.

- Si l'on prend les événements significatifs, cette valeur correspond à l'hirondelle de rivage. Ce qui augmente la probabilité de collision avec un aéronef lorsqu'elle est présente sur un aérodrome. Cette valeur de 12 cm correspond à l'occurrence d'un événement significatif.
- Si l'on prend les événements sérieux, cette valeur correspond à l'hirondelle de cheminée. La taille correspondante est de 15 cm.

📍 Analyse selon l'envergure de l'oiseau

Les graphiques suivants correspondent au traitement des événements en fonction de l'envergure. La même tendance que précédemment est observable. Les courbes sont pratiquement similaires.

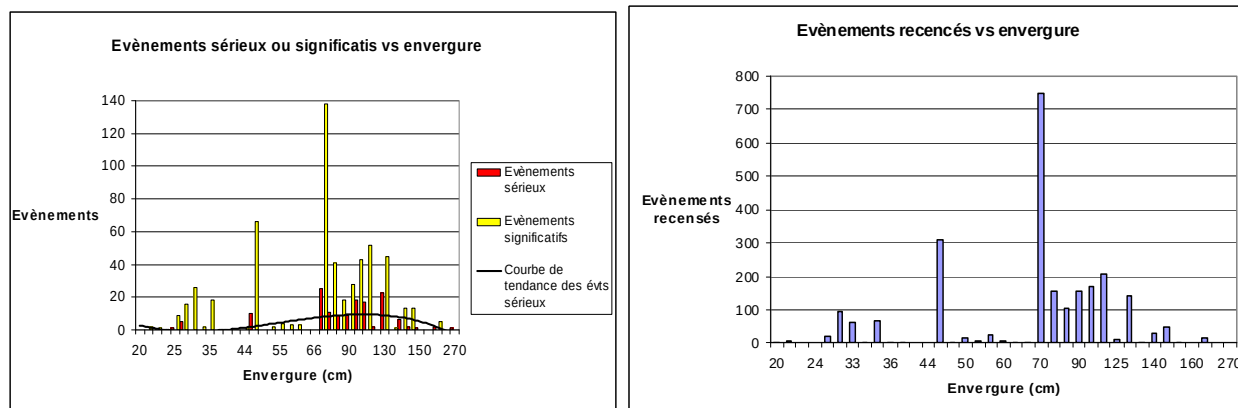


Figure 15 : Nombre d'événements en fonction de l'envergure de l'oiseau et du type d'événement

Pour ce qui concerne la gestion des événements significatifs, l'individu à retenir est le rouge-gorge dont l'envergure est de 20 cm.

Pour ce qui concerne la gestion des événements sérieux, l'individu à retenir est l'étourneau sansonnet dont l'envergure est de 30 cm.

🔗 Analyse selon la masse de l'oiseau

Les tendances observées pour les deux premiers paramètres se retrouvent ici.

Il ressort que la masse critique pour l'apparition d'un événement sérieux est 30 g (moineau). Les événements significatifs sont comptabilisés à partir de 13 g (hirondelle de rivage).

Ces masses bien que faibles représentent une valeur de référence pour une comparaison avec les performances d'un système de détection d'objet.

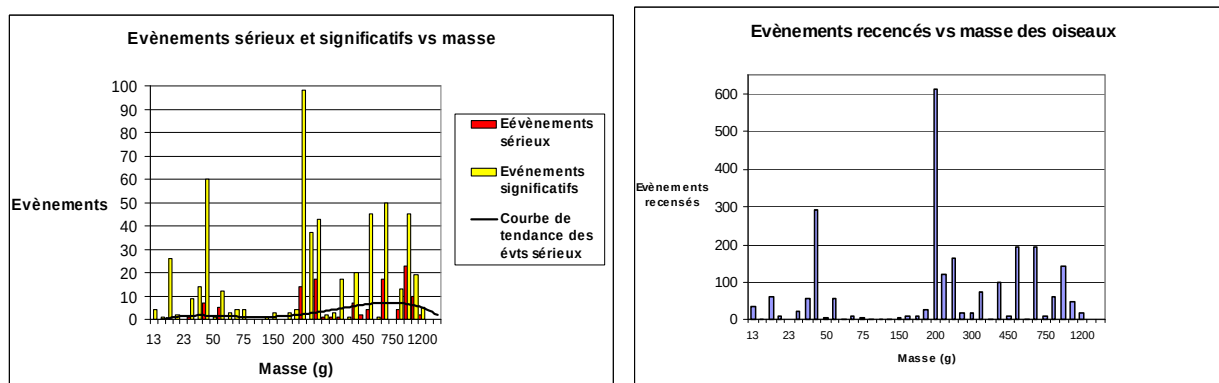


Figure 16 : Nombre d'événements en fonction de la masse de l'oiseau et du type d'événement

🔗 Analyse de la corrélation entre les trois paramètres

L'analyse des données PICA met en lumière trois paramètres principaux permettant de détecter les oiseaux. Cependant, certains de ces paramètres apparaissent difficiles à mesurer à distance (la masse en particulier). Dès lors, il a été retenu de procéder à une analyse de la corrélation entre ces différents paramètres.

Les deux graphiques suivants nous indiquent que la taille, la masse et l'envergure possèdent effectivement une forte dépendance. La distribution des nuages de points s'effectue de manière régulière autour d'une droite. Ce qui est une caractéristique du degré de corrélation de ces trois variables.

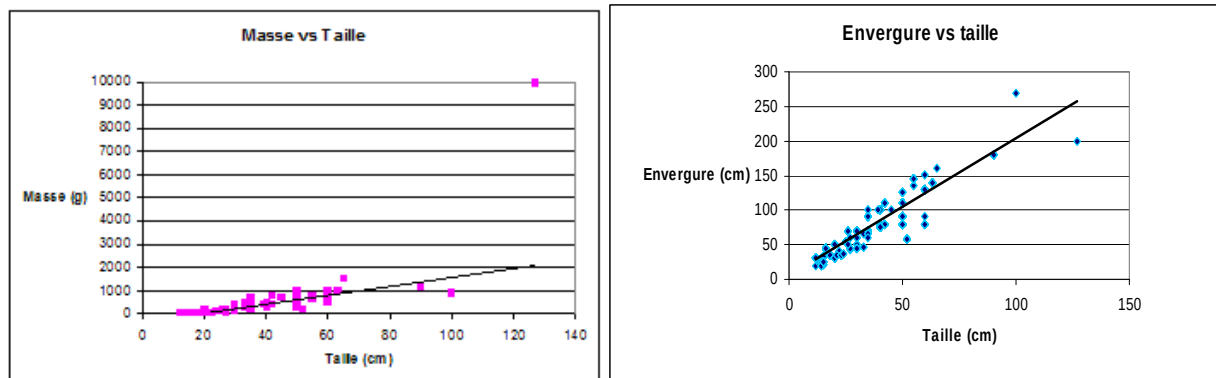


Figure 17 : Analyse de la corrélation entre la taille, l'envergure et la masse des oiseaux

4.4.2.2 Analyse des données sur les animaux se mouvant au sol

Pour la détermination des objets à identifier sur les pistes, il a été retenu d'utiliser la base de données du BEA afin d'identifier les types d'objets ayant donné lieu à des incidents ou à des accidents.

Une requête a été ainsi faite auprès du BEA afin de disposer de la liste des incidents et accidents où un animal a été identifié comme facteur causal ou contributif à l'événement.

Cette base comporte l'ensemble des événements traités par le BEA entre 1995 et 2005, survenus pendant les phases d'atterrissage et de décollage et impliquant un animal. 13 événements ont été identifiés, ce qui est particulièrement faible.

Les 13 événements relevés par le BEA concernent pour l'essentiel des chevreuils. Le plus petit animal concerné est le lièvre (on peut être surpris du peu de nombre d'événements liés à cet animal pourtant assez présent sur les aérodromes).

Très peu d'événements ont été relevés et ils permettent difficilement de tirer des conclusions.

En l'état actuel des choses, il est proposé de retenir le lièvre comme animal étalon pour la détection dans le cadre de la lutte contre le péril animalier (hors aviaire). Néanmoins, compte tenu de la présence plus importante de lapins sur les aérodromes par rapport aux lièvres, le lapin sera retenu de préférence, même si aucun événement n'a été relevé.

A noter toutefois les caractéristiques de ces animaux qui se meuvent et qui peuvent être masqués par la végétation.

4.4.2.3 Conclusions

Les données relatives au péril aviaire permettent de tirer des conclusions assez fiables sur les oiseaux qu'il convient de détecter : il s'agit d'oiseaux d'une taille de 12 cm si l'on souhaite se prémunir contre les événements significatifs et 15 cm si l'on souhaite se prémunir contre les événements sérieux (la définition de ces deux types d'événement est interne à l'étude).

Les données relatives au péril animalier sont, pour leur part, particulièrement lacunaires et mériteraient d'être complétées par des collectes d'informations du même type que ce qui est fait dans le cadre de la lutte contre le péril animalier. En l'état actuel des choses, les animaux d'une taille de 40 cm devraient être détectés.

On peut enfin noter que le seuil retenu pour le péril aviaire (voir précédemment) permet de répondre à l'objectif de détection pour le péril animalier, et donc une recherche complémentaire pour palier au peu de données relatives aux événements impliquant des lièvres ou des lapins n'est pas nécessaire pour la suite de l'étude. Il est donc retenu de prendre pour la détection des animaux, hors oiseaux, le seuil retenu pour les oiseaux.

4.5 Périmètre fonctionnel des systèmes automatiques de détection

Cette partie vise à reprendre les conclusions des analyses précédentes tant sur les objets à détecter que sur les fonctions que doivent avoir les systèmes de manière à répondre à la finalité attendue et à définir les caractéristiques minimales ou recommandées pour de tels systèmes.

4.5.1 Exigences fonctionnelles

Cinq fonctions particulières peuvent être identifiées pour les systèmes.

4.5.1.1 Fonction de détection

Cette fonction, comme son nom l'indique vise à repérer sur la piste des débris.

C'est une fonction fondamentale des systèmes étudiés ici.

4.5.1.2 Fonction d'alerte automatique

Cette fonction vient compléter la fonction de détection en assurant, de manière autonome, une information aux opérateurs de la détection d'un objet dans la zone surveillée.

C'est une fonction fondamentale des systèmes étudiés ici.

4.5.1.3 Fonction de localisation

Cette fonction permet de fournir une information de position de l'objet dans l'espace surveillé. Son but, principalement opérationnel, est d'accélérer le processus de collecte de l'objet en guidant les agents directement sur la source de l'alarme.

Cette fonction n'est pas indispensable aux systèmes, cependant elle représente une part importante de l'efficacité des systèmes (nécessité de limiter l'impact sur la capacité de la piste).

Cette fonction est particulièrement utile pendant les conditions de faible visibilité/luminosité où la localisation précise de l'objet permet un gain de temps important dans la collecte de l'objet.

Il est proposé de retenir cette fonction comme une fonction exigible des systèmes, au regard du gain qu'elle apporte à l'efficacité des systèmes.

4.5.1.4 Fonction de confirmation

Cette fonction permet à l'opérateur de lever un doute sur la réalité de la source de l'alarme. Dans l'idéal, elle est assurée par une seconde méthode de détection indépendante couplée à la première, cependant, un aperçu visuel de l'objet détecté peut être suffisant, du moment que cet aperçu n'est pas une image traitée et modifiée par le système.

Cette fonction n'est pas non plus indispensable, mais elle contribue à l'efficacité du système en limitant les fausses alarmes. Cette fonction peut être considérée comme essentielle pour les systèmes dont la méthode de détection principale présente un risque significatif de fausses alarmes.

Il est proposé de retenir cette fonction comme une fonction exigible des systèmes, au regard du gain qu'elle apporte à l'efficacité des systèmes.

4.5.1.5 Fonction d'identification

Cette fonction a pour objectif de fournir une information aux opérateurs sur la nature de l'objet détecté et, éventuellement, de fournir une aide à la décision, notamment pour déterminer le moment le plus approprié pour procéder à l'enlèvement de l'objet incriminé.

Cette fonction n'est pas nécessaire aux systèmes identifiés dans le cadre de l'étude, elle permet une gestion plus efficace des événements.

Elle nécessite en outre une meilleure classification des objets en fonction de leur caractère dangereux et une meilleure connaissance des paramètres les caractérisant. Il apparaît difficile, compte tenu de la connaissance actuelle des débris, d'assurer aujourd'hui une classification précise et fiable.

D'autres fonctions, se rapprochant de la fonction d'identification, peuvent être prévues :

- mesure de la taille de l'objet ;
- identification de matière dont l'objet est constitué ;
- recomposition de la forme de l'objet.

Ces dernières fonctions permettent à l'opérateur de mieux mesurer le risque associé à l'objet détecté. Cependant, elles nécessitent une plus grande expérience de l'opérateur qui a alors à prendre en compte ces différents paramètres pour évaluer le risque et prendre sa décision. Elles apportent notamment une précision pour la classification de l'objet détecté.

Cette fonction, bien qu'intéressante, nécessite une meilleure connaissance de ce que sont les objets qui présentent un risque pour les aéronefs. La méconnaissance des débris, des risques associés à leur présence et des critères de détermination des risques rend cette fonction non mature. Aussi, cette fonction peut être considérée comme un élément positif de jugement du système, mais son absence ne doit pas être considérée comme un manque pour l'évaluation des systèmes.

4.5.1.6 Remarques

Ces cinq fonctions sont indépendantes, seules les fonctions de détection et d'alerte automatique sont communes à l'ensemble des systèmes.

La fonction de confirmation pourrait être assurée dans un premier temps par un système visuel qui permet à la fois à l'opérateur d'appréhender concrètement l'objet détecté, mais également de disposer d'un premier niveau dans l'identification, l'opérateur avec son expérience pouvant identifier l'objet présent.

Il est retenu que la capacité du système à fournir une image de l'objet détecté est un élément important du système au regard du gain d'efficacité que l'image peut apporter pour la confirmation et l'identification.

Il convient cependant de ne pas considérer une identification de l'objet par l'opérateur comme une fonction d'identification du système.

4.5.2 Exigences opérationnelles

Les systèmes automatiques doivent apporter une avancée significative dans la lutte contre les objets présents sur les pistes d'aérodrome. A ce titre, ils doivent permettre de couvrir les principaux éléments limitatifs de la méthode actuelle. Ainsi, ils devraient pouvoir fonctionner dans les conditions suivantes.

4.5.2.1 Périodes de détection

Le système doit assurer une détection continue pendant les périodes où les opérations de piste sont possibles. Ainsi, un fonctionnement 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 est requis pour un tel système, en dehors des périodes de maintenance et de panne.

4.5.2.2 Compatibilité aéroportuaire

Le système ne doit pas avoir d'impact sur la capacité de la piste, c'est à dire que pendant les périodes de détection, le système ne doit pas imposer l'arrêt des opérations sur la piste.

Par ailleurs, le système, par son fonctionnement ne doit pas indûment provoquer les arrêts des opérations de piste, c'est à dire que le nombre de fausses alarmes doit être limité.

Enfin, le système, par son implantation, et par son mode de fonctionnement doit être compatible avec l'ensemble des contraintes liées à son implantation sur aérodrome.

On peut relever que les débris qui sont aujourd'hui collectés sur les pistes sont en nombre limité. Un certain nombre des objets présents peuvent être déplacés par les mouvements des aéronefs ou le vent. Aussi, on peut supposer que le nombre réel de débris présents sur les pistes est supérieur à celui des débris collectés. Une analyse opérationnelle pourrait permettre de mesurer l'impact des systèmes sur la capacité des pistes. En effet, les systèmes semblent apporter une plus-value en terme de capacité car la détection se fait sans occupation de la piste. Cependant, il est possible qu'avec un nombre d'alarme plus important que le nombre de débris collecté via les inspections visuelles, puisse venir atténuer ce gain.

4.5.2.3 Conditions de fonctionnement

Le système doit pouvoir assurer une détection efficace dans des conditions météorologiques et de visibilité dégradées. Cela sous entend :

- assurer une détection par mauvaise visibilité (brouillard, pluie, temps couvert, etc.) ; cette spécification est à prendre en compte en fonction du type d'opération sur la piste (approche de précision de catégorie I, approche de précision de catégorie II/III, approche à vue, décollage par faible visibilité, etc.) ;
- assurer une détection dans les conditions météorologiques correspondant aux conditions d'exploitation prévues de la piste (pluie, neige, etc.) ;
- assurer une détection de nuit lorsque des opérations de nuit ont lieu sur l'aérodrome concerné.

4.5.3 Exigences de performances

4.5.3.1 Caractéristiques des débris à détecter

En l'absence de données permettant de corréler les objets avec les dommages qu'ils peuvent causer sur les aéronefs (et donc les risques qu'ils représentent), aucun objectif de détection ne peut être établi de manière fiable.

Néanmoins, avec la connaissance des objets présents sur les pistes d'aérodrome, on peut recommander l'objectif suivant :

- objet de taille supérieure ou égale à 2 cm (recommandée)² ;
- objet de toutes les couleurs, avec une prédominance d'objets de couleur noire, grise, blanche ou réfléchissants ;
- objet de toute matière, notamment composé de matières organiques ;
- objet de toute forme, étant entendu que les objets plats représentent une part importante des objets trouvés sur les pistes d'aérodrome.

² En l'état actuel des connaissances sur les risques générés par la présence d'objet sur les pistes, un seuil de 2 cm peut être retenu dans un premier temps (voir paragraphe 2.4.1.3. Cette proposition de seuil ne peut être retenue comme garantie d'absence de dommage en cas d'ingestion, projection ou percussion d'un aéronef par un objet étranger.

L'objectif de détection des objets d'une taille de deux centimètres est à relativiser. En effet, d'une part, les objets d'une taille supérieure peuvent ne pas représenter de danger pour les aéronefs et des objets d'une taille plus petite peuvent en présenter un. D'autre part, les systèmes ne détectent pas tous exactement la taille, mais plus exactement la signature de l'objet, liée au mode de détection utilisé, qui peut varier d'un mode à l'autre.

4.5.3.2 Caractéristiques des animaux à détecter

Les données permettent un objectif de détection assez fiable. Les animaux à détecter sont les suivants :

- animaux mobiles (les systèmes devraient être à même de détecter des déplacements jusqu'à une vitesse de l'ordre de 100 km/h) ou immobiles ;
- animaux se mouvant au sol ou en l'air ;
- animaux d'une taille supérieure ou égale à 15 cm ;
- animaux de toute couleur.

Un objectif plus réduit peut être de limiter la détection aux animaux effectuant de petits mouvements autour de leur position (considérés immobiles par les systèmes).

4.5.3.3 La zone de détection

La zone à surveiller est la piste, ses accotements et ses portions de piste en amont des éventuels seuils décalés.

S'il est souhaité de détecter des animaux, alors, la bande devrait être couverte par la détection. Un objectif plus réduit peut être de reprendre la zone recommandée pour les débris en assurant la détection des animaux « immobiles ».

4.5.3.4 Le temps de détection

Le temps de détection doit être compatible avec la fréquence des mouvements sur la piste considérée. Sur les aérodromes à fort trafic, une fréquence de 1 minute et demie peut être atteinte. Ainsi un temps de détection de l'ordre de 1 minute permet de se prémunir des risques associés à la perte d'un objet par un aéronef pour l'aéronef qui le suit.

Des temps de détection plus importants peuvent être acceptés sous réserve de s'assurer qu'un nombre suffisamment réduit de mouvements ait lieu pendant le temps de détection.

5 Spécifications liées à l'intégration des systèmes sur les aérodromes

Cette partie a pour but d'identifier les différentes contraintes avec lesquels les systèmes doivent s'adapter. Ces différentes contraintes sont de trois natures :

- contraintes physiques liées à l'implantation du système ;
- contraintes techniques liées à la compatibilité du système avec le fonctionnement des différentes installations et équipements de l'aérodrome ;
- contraintes d'exploitation liées à l'utilisation du système dans le respect des procédures d'exploitation de l'aérodrome.

5.1 Les contraintes d'implantation

La présente partie vise à déterminer les différentes zones dans lesquelles des restrictions sont applicables pour l'implantation des équipements du système.

Remarque préliminaire : les systèmes de détection d'objet sur les pistes ne sont pas reconnus comme nécessaires pour les besoins de la navigation aérienne, aussi, les dispositions applicables aux matériels implantés pour les besoins de la navigation aérienne ne concernent pas les composants du système de détection d'objet sur pistes d'aérodrome.

Les différentes zones précitées sont les suivantes.

5.1.1 La piste elle-même et ses accotements

Les spécifications applicables sont définies dans le paragraphe 3 (annexe 1) de l'arrêté du 10/07/2006 relatif aux caractéristiques techniques de certains aérodromes terrestres utilisés par les aéronefs à voilure fixe.

Les composants du système ne doivent pas être implantés sur la piste et ses accotements, pour des raisons évidentes.

5.1.2 Les prolongements d'arrêt

Les spécifications applicables sont définies dans le paragraphe 6 (annexe 1) de l'arrêté du 10/07/2006 relatif aux caractéristiques techniques de certains aérodromes terrestres utilisés par les aéronefs à voilure fixe.

Les composants du système ne doivent pas être implantés sur les prolongements d'arrêt.

5.1.3 Les prolongements dégagés

Les spécifications applicables sont définies dans le paragraphe 10 (annexe 1) de l'arrêté du 10/07/2006 relatif aux caractéristiques techniques de certains aérodromes terrestres utilisés par les aéronefs à voilure fixe. Il est notamment spécifié qu'aucun matériel, ni aucune installation, à moins que ses fonctions n'imposent un tel emplacement pour les besoins de la navigation aérienne, n'est placé sur un prolongement dégagé, si ce matériel ou cette installation risque de constituer un danger pour un aéronef en vol.

Les composants du système peuvent être implantés sur les prolongements dégagés à condition que l'exploitant de l'aérodrome d'installation démontre que ces composants ne constituent pas un danger pour les aéronefs en vol.

Toutefois, une telle implantation n'est pas recommandée.

5.1.4 Les aires de sécurités d'extrémités de piste

Les spécifications applicables sont définies dans le paragraphe 9 (annexe 1) de l'arrêté du 10/07/2006 relatif aux caractéristiques techniques de certains aérodromes terrestres utilisés par les aéronefs à voilure fixe. Il est notamment spécifié qu'aucun matériel, ni aucune installation, n'est placé sur l'aire de sécurité d'extrémité de piste si ce matériel ou cette installation risque de constituer un danger pour les aéronefs, à moins que ses fonctions n'imposent un tel emplacement pour les besoins de la navigation aérienne.

Les composants du système peuvent être implantés sur les aires de sécurités d'extrémités de piste à condition que l'exploitant de l'aérodrome concerné démontre que les composants concernés ne constituent pas un danger pour les aéronefs.

Pour des raisons évidentes de sécurité (l'aire est destinée à éviter les dommages aux aéronefs en cas de sortie de piste), il n'est pas recommandé d'envisager un tel emplacement.

5.1.5 Les bandes de piste

Les spécifications applicables sont définies dans deux arrêtés :

- l'arrêté du 10/07/2006 relatif aux caractéristiques techniques de certains aérodromes terrestres utilisés par les aéronefs à voilure fixe (paragraphe 8 - annexe 1). Il est notamment spécifié que :
 - aucun matériel, ni aucune installation, n'est placé sur la bande de piste si ce matériel ou cette installation risque de constituer un danger pour les aéronefs, à moins que ses fonctions n'imposent un tel emplacement pour les besoins de la navigation aérienne ;
 - aucun objet fixe, sauf s'il est nécessaire pour les besoins de la navigation aérienne ne se trouve sur la bande aménagée de la piste si celle-ci est avec approche de précision.
- l'arrêté du 14 mars 2007 modifiant l'arrêté du 28 août 2003 relatif aux conditions d'homologation et aux procédures d'exploitation des aérodromes qui précise pour les pistes avec approche de précisions, que les objets, situés dans la bande aménagée, susceptibles de constituer un danger, sont considérés comme des obstacles et enlevés ; toutefois, certains matériels installés pour les besoins de la navigation peuvent subsister, à condition, d'avoir une masse et une hauteur aussi faible que possible et d'être, par conception, frangibles (voir I.1.2 de l'arrêté).

En conséquence, les composants du système peuvent être implantés sur les bandes de piste (hors partie aménagée des pistes avec approche de précision) s'il est démontré par l'exploitant de l'aérodrome concerné que les composants concernés ne constituent pas un danger pour les aéronefs. Comme pour l'aire de sécurité d'extrémité de piste, il n'est pas recommandé, pour des raisons évidentes de sécurité, d'envisager l'implantation d'un tel système sur cette aire.

Les composants du système ne peuvent pas être implantés sur les bandes aménagées de pistes avec approche de précision.

5.1.6 Les aires d'avant seuil

Les spécifications applicables sont définies par l'arrêté du 10/07/2006 relatif aux caractéristiques techniques de certains aérodromes terrestres utilisés par les aéronefs à voilure fixe (paragraphe 11 – annexe 1). Il est notamment spécifié qu'à moins que leurs fonctions ne l'exigent pour les besoins de la navigation aérienne, aucun matériel ni aucune installation n'est placé dans cette aire opérationnelle.

Les composants du système ne peuvent pas être implantés sur les aires d'avant seuil (ces aires ne concernent que les pistes avec approche de précision).

5.1.7 Les voies de circulation

Les spécifications applicables aux voies de circulation sont définies par l'arrêté du 10/07/2006 relatif aux caractéristiques techniques de certains aérodromes terrestres utilisés par les aéronefs à voilure fixe (paragraphe 12 - annexe 1).

Pour une raison évidente, les composants du système ne peuvent pas être implantés sur les voies de circulation.

5.1.8 Les bandes de voies de circulation

Les spécifications applicables aux bandes de voies de circulation sont définies par l'arrêté du 10/07/2006 relatif aux caractéristiques techniques de certains aérodromes terrestres utilisés par les aéronefs à voilure fixe (paragraphe 13 - annexe 1). Cet arrêté interdit la présence d'objet (hors matériels implantés pour les besoins de la navigation aérienne), mais ne définit pas de caractéristiques dimensionnelles pour cette aire. Cependant, le paragraphe 14 de ce même arrêté définit des distances en deçà desquelles il est interdit d'implanter des matériels (exception faite des matériels implantés pour les besoins de la navigation aérienne).

Dans la mesure où l'instruction technique sur les aérodromes civils établit une corrélation entre la bande de voie de circulation et les marges de dégagement, il est proposé de les associer ici.

Ainsi, les composants du système de détection ne peuvent pas être implantés à une distance inférieure à la distance minimale de séparation qui se superpose à la bande de voie de circulation.

5.1.9 Les servitudes

Sur les aérodromes, trois types de servitudes sont applicables autour de la piste :

- les servitudes de dégagement (code de l'aviation civile, livre II, chapitre 4) ;
- les servitudes de protection des équipements radioélectriques contre les obstacles (code des postes et communications électroniques) ;
- les servitudes de protection des équipements radioélectriques contre les perturbations électromagnétiques (code des postes et communications électroniques)

Pour ce qui concerne les servitudes de dégagement, le code de l'aviation civile interdit l'implantation d'obstacles qui percent les surfaces de servitudes.

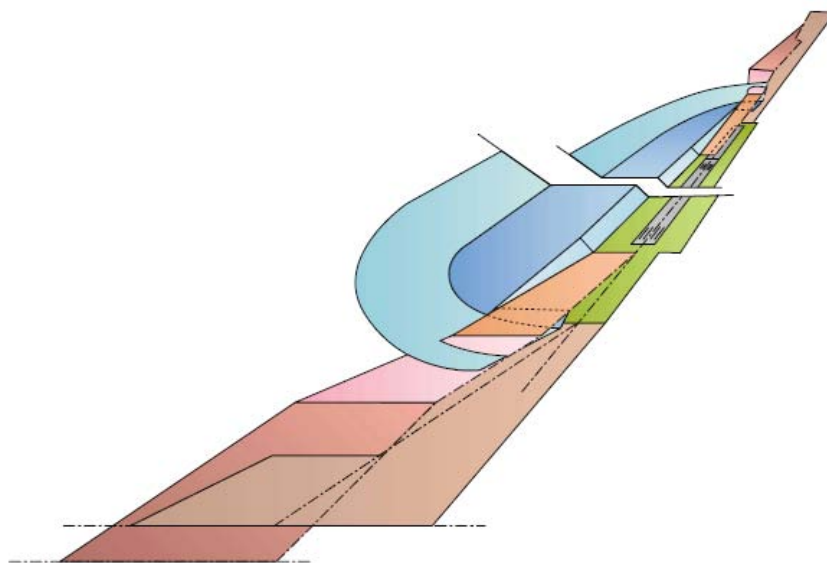


Figure 18 : Apparence générale des servitudes (source ITAC)

Le schéma ci-dessus (figure 18) montre l'apparence des surfaces de servitudes aéronautiques de dégagement.

Par ailleurs, le plan de servitudes aéronautiques de dégagement institue également les surfaces de protection des aides visuelles et de protection des aides météorologiques. Ainsi, le respect du plan de servitudes aéronautiques permet de garantir que la localisation des composants du système n'aura pas d'impact sur les équipements de navigation aérienne et météorologiques.

Par leurs caractéristiques, les composants des systèmes de détection d'objets sur les pistes d'aérodrome doivent respecter les surfaces arrêtées ou décrétées dans le plan de servitudes aéronautiques.

Les surfaces de servitudes de protection des aides radioélectriques contre les obstacles sont instituées par décrets et sont propres à chaque aérodrome, car elles dépendent de la localisation de ces aides.

Le respect des servitudes de protection contre les perturbations électromagnétiques seront traitées dans la section « Les contraintes de fonctionnement » (section suivante).

5.1.10 Les dégagements

Trois types de dégagements sont à considérer :

- les dégagements aéronautiques servant à délimiter l'espace qu'il convient de garder libre de tout obstacle pour permettre aux aéronefs à voilure fixe, appelés à utiliser ces aérodromes, d'évoluer avec la sécurité voulue ;
- les surfaces OFZ ;
- les dégagements aéronautiques servant à protéger les aides visuelles.

Les spécifications relatives à la construction des surfaces de dégagements aéronautiques et aux OFZ sont définies dans l'annexe 2 de l'arrêté du 10/07/2006 relatif aux caractéristiques techniques de certains aérodromes terrestres utilisés par les aéronefs à voilure fixe. Ces surfaces sont élaborées selon les mêmes normes que pour les servitudes.

5.1.11 Schéma synthétique des contraintes de site

L'exemple ci-dessous (figure 19 à figure 21) montre les différentes contraintes concernant l'implantation des composants des systèmes pour une piste avec approche de précision de chiffre de code 4 :

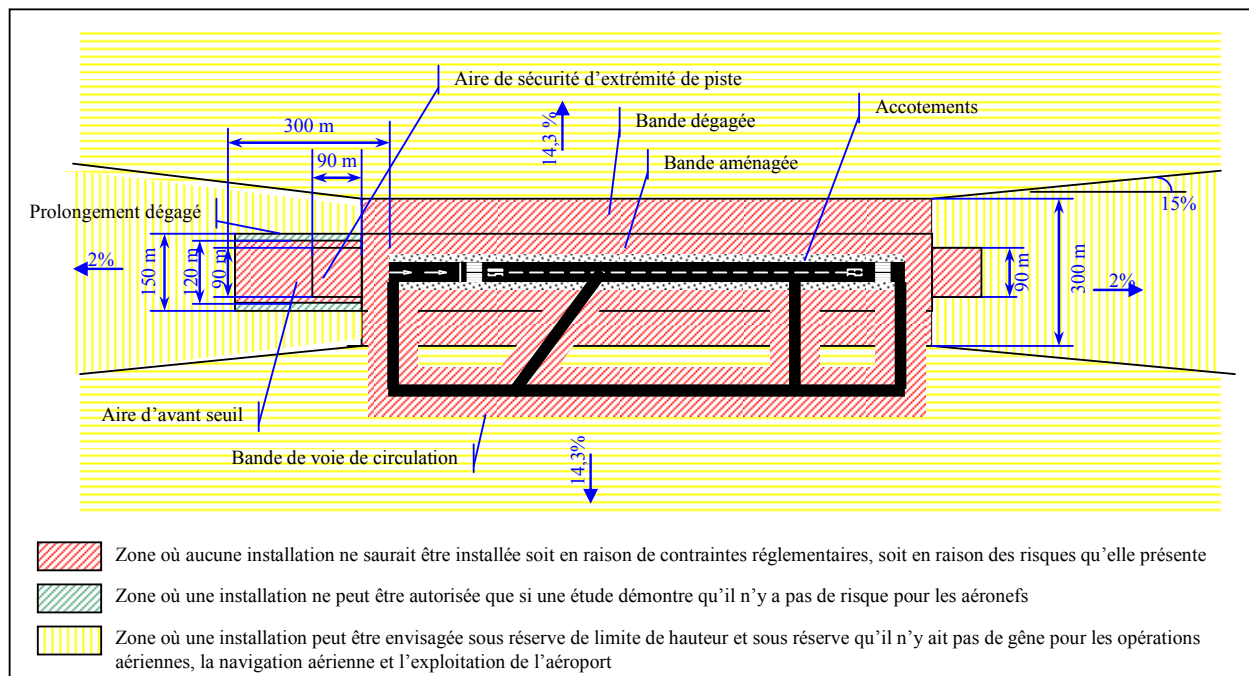
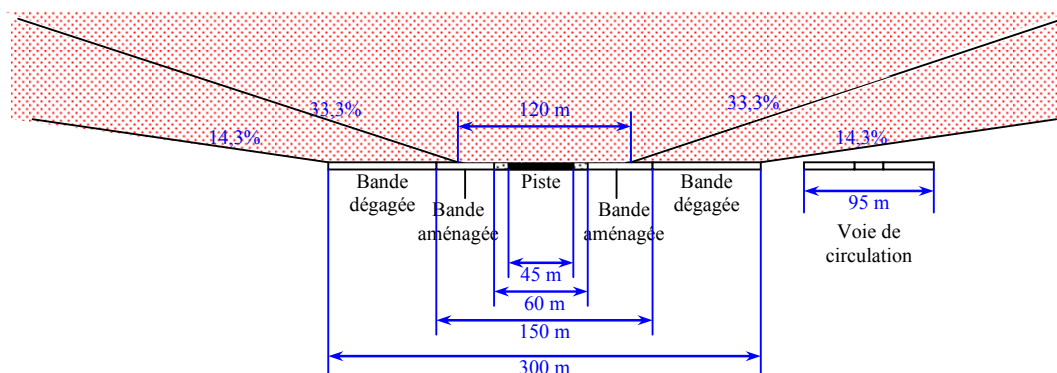


Figure 19 : Vue de dessus des contraintes de site

(Note : la piste a été prise avec deux trouées d'atterrissage)

Dans un souci de simplification, les figures 19 à 21 font apparaître l'aire de sécurité d'extrémité de piste à un unique seuil)

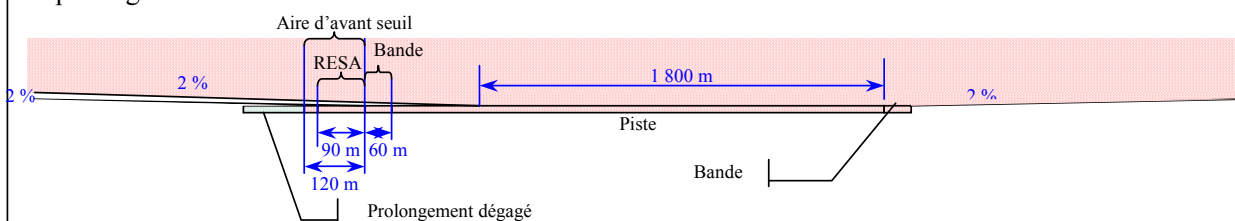
Coupe transversale



- Zone où aucun composant du système ne peut être implanté
- Zone où un composant du système peut être implanté si une étude démontre que l'objet ne présente pas de risque pour les aéronefs

Figure 20 : Coupe transversale des contraintes de site

Coupe longitudinale



- Zone où aucun composant du système ne peut être implanté
- Zone où un composant du système peut être implanté si une étude démontre que l'objet ne présente pas de risque pour les aéronefs

Figure 21 : Coupe longitudinale des contraintes de site

On peut noter le peu de possibilité d'implantation et les limitations liées au nombre de voies de circulation. Cette contrainte impacte très fortement les systèmes réclamant le positionnement d'un nombre important de détecteurs et de récepteurs à proximité de la piste.

5.2 Les contraintes de fonctionnement

Lorsqu'ils sont en fonctionnement, les systèmes de détection d'objets sur les pistes d'aérodromes ne doivent pas altérer les équipements nécessaires à la navigation aérienne.

Les différents équipements concernés sont :

- les aides visuelles ;
- les aides radioélectriques.

Pour le premier point, il convient ici de s'assurer que les émissions lumineuses du système ne perturbent pas la lisibilité du balisage par les usagers de l'aire de manœuvre. C'est à dire que les couleurs utilisées par le

balisage ne doivent pas être utilisées par les composants du système. De la même manière, les systèmes ne doivent pas masquer les aides visuelles.

Le système ne doit pas perturber les signaux émis par les aides radioélectriques à la navigation aérienne. Aussi, il convient de s'assurer que les émissions radioélectriques des systèmes sont compatibles avec les signaux électromagnétiques des aides à la navigation aérienne. La protection des aides radioélectriques contre les perturbations électromagnétiques est assurée par le plan de servitudes radioélectriques contre les perturbations électromagnétiques. Aussi, le respect de ce plan permet de garantir que les équipements radioélectriques d'aide à la navigation aérienne ne sont pas impactés par le système.

Par ailleurs, le système doit s'intégrer dans les réseaux de l'aérodrome. Il convient donc d'identifier clairement les réseaux sur lesquels le système fonctionnera : utilisation du réseau d'énergie, utilisation du réseau de communication. Cependant cet aspect dépend de l'équipement en place sur l'aérodrome.

5.3 Les contraintes d'exploitation de l'aérodrome

En opération, les systèmes ne doivent pas nuire à la sécurité, la régularité et l'efficacité de l'exploitation de l'aérodrome. Ainsi, les systèmes de détection d'objets sur les pistes doivent, en fonctionnement, ne pas avoir d'impact néfaste et indu sur les aéronefs et la capacité de l'aérodrome.

- Les systèmes ne doivent pas porter atteinte aux aéronefs, à ses passagers et aux personnes amenées à emprunter la piste. En particulier, les systèmes ne doivent pas nuire à la vision des pilotes par l'engendrement de signaux visuels inappropriés, ne doivent pas altérer le fonctionnement des équipements à bord des aéronefs par l'émission d'ondes parasites et ne doivent pas porter atteinte à la santé des personnes à bord des aéronefs. Une démonstration visant à écarter ces différents risques doit être apportée par les fabricants des systèmes.
- Les systèmes ne doivent pas porter atteinte à la capacité de la piste de manière induue. Cela sous-entend que le taux de fausses alarmes doit être aussi bas que possible et que leur utilisation ne devrait pas réduire la capacité des pistes (cas par exemple d'un système imposant pendant son fonctionnement l'arrêt des opérations de piste).

Dans le second point, on peut relever un risque qui mérite d'être vérifié en utilisation opérationnelle : il peut être raisonnablement envisagé que le nombre de débris réellement présents sur les chaussées aéronautiques sont supérieurs au nombre de débris collectés (certains débris pouvant être soufflés par les réacteurs, ou poussés par le vent, dans les bandes où ils ne sont pas aisément identifiables et collectés). De ce fait, on peut supposer un nombre d'alarme réellement provoquées par la présence d'un objet, supérieur au nombre de débris collectés actuellement, d'où une possible perte de capacité dû à un nombre d'intervention sur piste supérieur.

5.4 Les contraintes d'exploitation sur les systèmes

Les systèmes doivent s'intégrer dans le processus d'exploitation de l'aérodrome et notamment de la piste. Il apparaît en effet essentiel que le système ne rende pas plus complexe l'exploitation de la piste.

Le système doit s'intégrer dans les processus de décision et une architecture allant de la détection d'un objet sur la piste à son enlèvement doit être définie. En effet, les systèmes sont implantés par les exploitants d'aérodrome, cependant toute intervention sur la piste est décidée par le prestataire de navigation aérienne. Cette architecture d'opération doit permettre d'avoir un impact sur l'exploitation aussi faible que possible. Le processus, proposé de concert par l'exploitant et le fabricant, doit traiter les cas suivants :

- processus de décision en cas d'alarme alors que la piste n'est pas occupée par un aéronef ;
- processus de décision en cas d'alarme alors qu'un aéronef est en approche finale (définition des situations où une remise de gaz est demandée par le prestataire de navigation aérienne) ;

- processus de décision en cas d'alarme alors qu'un aéronef est au décollage (définition des situations où une accélération arrêt est préférable) ;
- processus de décision alors que le système ne détecte pas d'objet sur la piste, alors qu'un pilote signale un objet ;
- processus de décision suite au signalement d'un pilote de la présence d'un objet sur la piste et que le système détecte bien un objet (confirmation que l'objet signalé par le pilote correspond à celui identifié par le système) ;
- processus de décision au cas où un pilote signale un problème à l'atterrissage ou au décollage (par exemple suite à une collision aviaire, soupçons d'éclatement de pneu, ou autre) et que le système ne détecte pas d'objet ;
- processus de décision au cas où un pilote signale un problème à l'atterrissage ou au décollage (cf. cas précédent) et que le système détecte effectivement un objet (confirmation que l'objet identifié par le système est bien lié au problème signalé par le pilote).

Ces différents processus de décision peuvent intégrer les notions de taille, d'apparence ou de localisation du débris afin de prendre la meilleure décision. La notion de risque pour les différents acteurs ne peut être négligée ici, compte tenu du fait que la détection est continue et peut intervenir à tout moment. Afin de permettre une utilisation efficace du système, il est indispensable que les prises de décision soient établies préalablement à l'installation du système.

Ces processus de décision doivent faire apparaître les méthodes de confirmation des alarmes. Il apparaît en effet essentiel que dans un but de limiter les fausses alarmes et de s'assurer du caractère dangereux de l'objet, que des informations soient disponibles sur la nature de l'objet. Le meilleur moyen est d'obtenir une confirmation visuelle de l'objet et sa localisation. Néanmoins, ces procédures doivent être établies en étroite collaboration avec les services de l'exploitant et du prestataire de la navigation aérienne, et l'absence de telles procédures fournies par les fabricants n'est pas préjudiciable pour l'utilisation des systèmes.

Par ailleurs, des procédures doivent être définies afin de gérer les situations dégradées :

- méthodes de détection des dysfonctionnements du système (processus d'autodiagnostic du système) ;
- les procédures de gestion en cas de dysfonctionnement d'éléments du système, notamment les situations où le système ne peut plus être considéré comme opérationnel ;
- identification des conditions dans lesquelles le système présente des performances altérées (par exemple, présence de pluie ou de brouillard pouvant réduire la capacité du système à détecter des objets), avec définition des procédures mises en place (par exemple : désactivation du processus d'alerte lorsque les conditions sont telles que les taux de fausses alarmes et de non détection d'objet dépasse un seuil défini).

Il est en effet essentiel que les situations où le système cesse d'offrir une surveillance satisfaisante (pannes, pertes de performance, conduisant à un taux de détection inacceptable) puissent être identifiées afin d'adapter la méthode de lutte contre la présence de débris.

Ces procédures sont définies au cas par cas avec l'exploitant de l'aérodrome et ne sont pas fournies par les fabricants.

Enfin, le système ne doit pas être affecté par les activités « normales » de la piste : évolution des aéronefs et des véhicules.

6 Généralités sur les systèmes utilisables pour la lutte contre les objets étrangers sur les pistes d'aérodrome

Cette partie de l'étude est consacrée aux technologies des systèmes de détection automatique des objets sur les pistes d'aérodrome. Elle liste les systèmes sélectionnés lors de la recherche documentaire et expose les principes généraux de fonctionnement les concernant.

Le principe de la détection est aujourd'hui utilisé dans de multiples domaines. Ainsi, les systèmes de détection développés et exploités actuellement remplissent différentes fonctions telles que la surveillance, le contrôle, la prévention, la caractérisation et bien d'autres. Ces fonctions correspondent à un ou plusieurs objectifs précis par exemple, la lutte contre les intrusions de personnes ou d'animaux en environnement clos, la détection d'explosifs, la détection automatique d'incident en milieu routier, la détection d'objets sur voies ferrées, etc. La diversité des objectifs liés à la détection a incité certains concepteurs et fabricants à transposer un système de détection d'un domaine d'application vers un autre.

En conséquence, durant la phase d'identification des systèmes de détection de cette étude, il s'est agi de relever sans discrimination les systèmes répondant directement à l'objectif précité de détection des objets sur les pistes d'aérodrome ainsi que les systèmes de détection utilisés hors environnement aéroportuaire, et pouvant être adaptés.

6.1 Identification des systèmes

6.1.1 Méthode de recherche

La recherche documentaire s'est effectuée à partir de mots clés, basés sur les termes utilisés dans la réglementation, les termes liés à la détection et les termes liés aux technologies. Cette base a été actualisée en fonction des résultats obtenus. La recherche documentaire sur Internet a été menée en utilisant plusieurs moteurs de recherche afin de couvrir une zone de recherche la plus large possible.

La recherche auprès des services techniques du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de la Mer, qui sont susceptibles de rencontrer des problématiques proches de celle de la détection des objets et des débris sur les pistes, a conduit à identifier certains systèmes ; la liste des mots clés de la recherche Internet a été revue autant que de besoin.

6.1.2 Sélection des systèmes

La recherche a permis d'identifier un certain nombre de systèmes. Leurs caractéristiques ont été analysées au regard des performances et fonctions attendues (présentées dans le chapitre 4), ce qui a permis d'en faire émerger quatre qui sont présentés dans le titre 7.

Les systèmes qui ont pu être identifiés lors de la recherche, mais dont les fonctions ne semblaient pas correspondre à celles attendues sont brièvement décrits en annexe b du présent rapport. Il est en effet possible que des adaptations, des évolutions puissent permettre de les utiliser ultérieurement pour la détection automatique d'objets étrangers sur les pistes d'aérodrome. Un suivi de ces produits serait utile.

6.2 Principes généraux des systèmes de détection

Les systèmes identifiés sont basés sur plusieurs technologies. Il convient de spécifier préalablement les principes de fonctionnement des systèmes de détection et les termes techniques associés, ainsi que de décrire les technologies sur lesquelles reposent ces systèmes.

Les systèmes identifiés dans cette étude mettent en jeu des techniques dont les principes de fonctionnement reposent sur l'utilisation d'un signal, sous la forme d'une onde électromagnétique, émis et/ou reçu par ces systèmes. Dans cette étude, ces systèmes exploitent exclusivement les ondes du spectre électromagnétique du domaine radioélectrique, de l'infrarouge et de l'optique ou de la lumière visible.

6.2.1 Principe de fonctionnement d'un système de détection

Comme indiqué dans le schéma ci-après, un système de détection d'objets étrangers fait intervenir trois couches :

- la couche physique comprenant le détecteur qui a pour rôle de récupérer le signal en provenance de l'objet et de le transformer en un signal utilisable pour un traitement automatisé ;
- la couche traitement récupérant le signal issu de la couche physique afin de fournir l'information qui servira de support à une prise de décision ;
- la couche exploitation représentant l'utilisateur ou le groupe d'utilisateurs qui, en fonction de l'information fournie par la couche traitement, décidera de la procédure à appliquer pour traiter l'information.

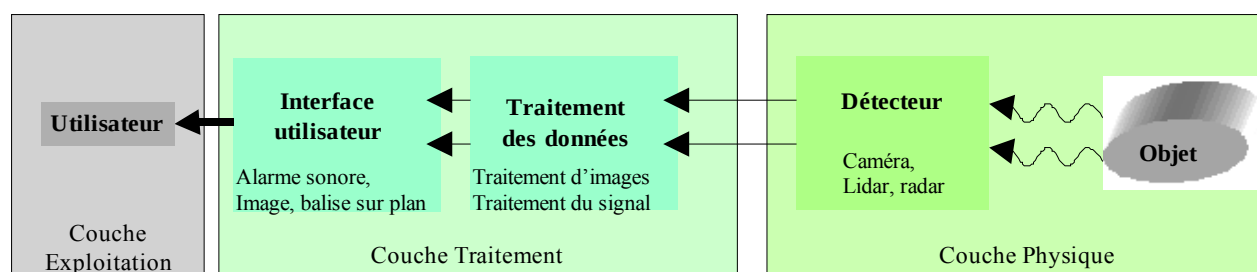


Figure 22 : Principe de fonctionnement d'un système de détection (source LEAT)

6.2.2 Définitions

6.2.2.1 Systèmes actifs - passifs

Il convient de distinguer les systèmes de détection passifs des systèmes dits actifs. Cette distinction a lieu au niveau de la couche physique par l'intermédiaire du détecteur (voir schéma ci-dessous).

Dans le cas d'un système de détection actif (figure 23 -a ci-après), un signal est émis par le détecteur en direction de l'objet, est réfléchi par l'objet, puis capté. C'est le cas des radars, des lidars ou ladars ou encore des systèmes infrarouges ou optiques actifs.

Dans un système de détection passif (figure 23-b ci-après), le système n'émet pas de signal, le détecteur exploite le rayonnement électromagnétique émis par l'objet. Cela peut être une émission thermique captée par une caméra infrarouge, lumineuse captée par une caméra vidéo, micro-onde ou millimétrique captée par les radiomètres.

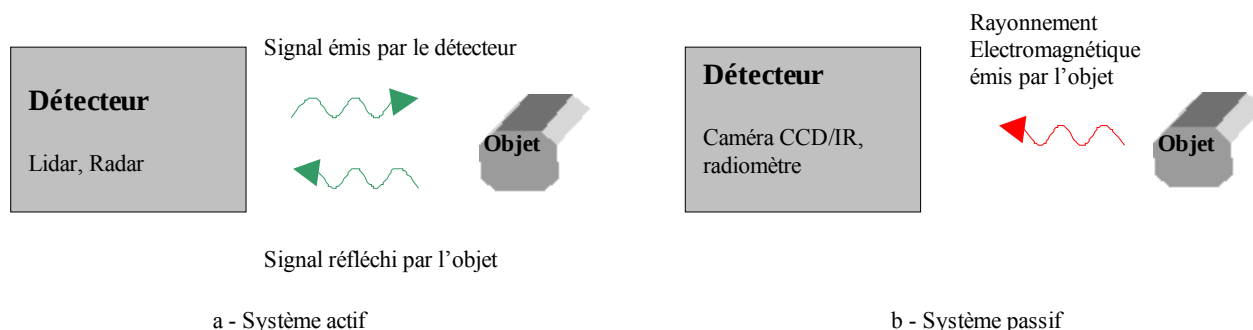


Figure 23 : Distinction système actif – système passif

6.2.2.2 Détection et classification

La détection est la capacité du système à déterminer la présence d'un objet. Elle permet éventuellement d'accéder à des paramètres de l'objet tels que :

- la signature radar ou SER (Surface Equivalente Radar) pour un système radar ;
- une vue de l'objet pour une caméra vidéo ;
- un niveau de rayonnement thermique pour une caméra infrarouge (IR).

Ces paramètres sont ceux qui peuvent être mesurés directement par le détecteur. Ils apportent une information mais ne permettent en aucun cas de conclure à coup sûr sur la nature de l'objet (matériau, forme, position sur la piste - la position signifie ici, la façon dont l'objet est posé sur la piste -).

Dans le cas où elle est prévue, la classification intervient dans la couche traitement du système, la classification complète la fonction de détection. Il s'agit d'une procédure qui permet d'identifier les objets par des critères établis à l'avance, par exemple sur la forme, la taille des objets détectés. Dans cette procédure, une base de données des objets détectés se constitue au fur et à mesure. A partir de cette base de données, le système fournit une information automatisée directement utilisable. La classification assiste l'utilisateur dans la prise de décision. A ce titre, la classification participe à la réduction du taux de fausses alarmes.

6.3 Grandeurs caractéristiques d'un système de détection

Des grandeurs caractéristiques ont été définies quel que soit le type de détecteur, afin de comparer les performances des systèmes entre eux. Ces grandeurs sont les suivantes :

- la résolution d'un système est la plus petite distance entre deux objets distincts, à partir de laquelle le système identifie séparément les deux objets de manière simultanée ;
- la précision de localisation d'un système est la différence minimale entre l'information de position de l'objet fournie par le système et sa position réelle sur la piste ;
- la portée du système est la distance maximale entre le détecteur et un objet, à partir de laquelle l'objet étalon n'est plus détectable ;
- la sensibilité du système est son aptitude à réagir aux plus petites variations du signal reçu par le détecteur ;
- la reproductibilité est la détection répétitive d'un même objet effectuée dans les mêmes conditions de détection.

6.3.1 Fausses alarmes

Une fausse alarme est une alerte délivrée par le système sans raison, c'est à dire sans que la situation ne nécessite d'intervention ou d'action. L'origine d'une fausse alarme peut se situer au niveau de la couche physique et/ou de la couche traitement du système.

Il peut y avoir deux types de fausses alarmes :

- les fausses alarmes techniques : la fausse alarme est due au système lui-même (par exemple, le rapport bruit propre au capteur est très élevé, conduisant à la production d'un signal parasite à même d'être interprété lors du traitement comme un débris, réglage trop bas de la sensibilité –ie. le seuil d'alarme est trop proche du bruit propre au capteur-) ;
- les fausses alarmes fonctionnelles : la fausse alarme est due à la fonction de détection (mauvaise interprétation d'un signal par la couche de traitement).

Les fausses alarmes peuvent être levées par l'ajout d'une fonction de confirmation.

6.3.2 Principes des technologies de détection utilisées

Les techniques de détection utilisées par les systèmes retenus dans le cadre de l'étude sont les suivantes :

- la détection optique ;
- la détection radar ;
- la détection lidar.

Les paragraphes qui suivent expliquent les principes généraux des détections utilisées dans les systèmes identifiés.

6.3.2.1 *Les systèmes optiques*

↳ **Principe de fonctionnement**

Les systèmes de détection optique s'appuient sur l'analyse d'images vidéo, enregistrées en continu et obtenues à partir d'un détecteur optique. La détection d'objets est obtenue après application de méthodes de traitement d'images sur les images enregistrées.

La détection peut être passive ou active.

↳ **Détecteur optique**

Dans le cadre de la détection optique, le détecteur utilisé est une caméra vidéo. Celle-ci est composée de trois éléments : le capteur photosensible, l'objectif ou optique constitué d'un assemblage de lentilles optiques et les cartes de traitement du signal vidéo.

⇒ **Les capteurs photosensibles qui peuvent être de type :**

A) Capteur CCD

Le capteur CCD d'une caméra vidéo est une puce électronique dont la surface photosensible reçoit un rayonnement émis par une scène, éclairée par une source naturelle ou non. Cette surface est découpée en photosites représentant les points élémentaires des images numériques et produisant un signal électrique en fonction de la lumière reçue. L'image numérique est obtenue après une conversion analogique-numérique du signal électrique issu du capteur CCD.

B) Capteur CMOS

Un autre type de capteur photosensible équipe certaines caméras vidéo disponibles sur le marché, il s'agit du capteur CMOS, la commercialisation de ces caméras est moins importante que les caméras CCD.

Les puces CMOS fonctionnent sur le même principe que les puces CCD, mais chaque photosite comprend un composant électronique additionnel permettant de traduire directement le signal électrique en signal logique.

⇒ **Taille des capteurs**

La taille des capteurs et leur définition ont une influence sur l'image capturée par la puce (CCD ou CMOS). En effet, le couple (taille-définition) des capteurs a une influence sur la taille des photosites composant la puce. Plus la taille des photosites est réduite, plus le bruit s'avère élevé. En effet, le bruit sur les capteurs optiques peut provenir de plusieurs sources :

- le bruit photonique (dispersion des photons due à la nature corpusculaire de la lumière et conduisant à ce que certains photons arrivent à un endroit du capteur différent du point de focalisation géométrique) ; ce bruit ne peut être atténué car il est indépendant du capteur ; par contre, il est proportionnel à la racine carrée du nombre de photons capturés par le photosite (c'est à dire que plus le photosite capte de photons, plus ce bruit représente une part faible du nombre de photons capturés) ; ainsi, plus les photosites sont grands, plus ils capteront de lumière et donc plus le bruit photonique sera en proportion moindre ;
- le bruit électronique directement lié au capteur et à l'électronique (échauffement du capteur, rapprochement des circuits électroniques, taille des photosites, etc.). Là encore, plus les photosites sont petits (donc avec capteur haute définition de petite taille), plus le bruit sera important ; ce bruit peut être traité, mais cela conduit en général à une perte de détails préjudiciable à la détection ;

⇒ **Les objectifs ou optiques**

L'optique dont la caméra est équipée, détermine pour une large part la qualité de l'image en termes de netteté, contraste et absence de déformations. La qualité de l'image est particulièrement affectée par des défauts ou aberrations introduites par les lentilles du système optique et qui sont dues aux effets de bords mais aussi à la dispersion de la lumière lors de la traversée de l'objectif (on parle alors d'aberrations géométriques et chromatiques). Certains des défauts optiques peuvent être corrigés informatiquement (distorsion géométrique par exemple).

Les paramètres essentiels qui guident la sélection des optiques sont le grossissement, le pouvoir séparateur qui fixe la finesse des détails des objets à identifier, la distance d'observation, et la profondeur de champ. Les objectifs peuvent avoir des distances focales fixes ou ajustables (zooms). Les focales courantes s'étendent de quelques centimètres (courtes distances) dans le cas d'objectifs grands angles, à quelques dizaines de centimètres (longues distances) dans le cas des téléobjectifs.

⇒ **Les cartes de traitement du signal vidéo**

Ces cartes permettent de transformer l'ensemble des signaux en provenance du capteur photosensible en une image. Des fonctions de prétraitement de l'image peuvent être intégrées dans ces cartes (réduction du bruit, suppression d'éléments de l'image, etc.). Elles mettent en forme des signaux générés par les photosites pour constituer une image en vue de sa transmission vers les unités de traitement d'images (qui peuvent être également matérielles et/ou logicielles).

⇒ **Implantation des détecteurs**

La décision d'utiliser des détecteurs optiques nécessite de prendre en compte, outre les paramètres intrinsèques (notamment la focale, la définition du capteur) développés précédemment, des paramètres extrinsèques, notamment la distance d'implantation de la caméra, l'inclinaison de la caméra, la stabilisation de

la caméra. Ces paramètres dépendent de l'objectif de détection (principalement ici la surface à surveiller et les objets à détecter).

⇒ **La distance d'implantation**

Les caméras actuelles, équipées d'optiques et de capteurs à haute définition, peuvent être implantées à une distance supérieure à 150 mètres. Cette distance correspond à la distance minimale par rapport à l'axe de la piste en deçà de laquelle aucune installation ne doit être implantée sans qu'il n'ait été démontré qu'elle n'a pas d'impact sur la sécurité (voir §3.1).

⇒ **La stabilisation du détecteur**

L'implantation des détecteurs peut se réaliser au moyen d'un mât, d'un pylône ou d'une tour métallique. La hauteur maximale admise pour ces structures à une distance de 250 mètres de l'axe de la piste est 15 mètres en respect de la surface de dégagement (surface qui peut être percée si une étude démontre que cela n'a pas d'impact sur la sécurité des aéronefs – voir §5.1).

A cette hauteur et à cette distance, leur structure doit garantir une stabilité de l'ensemble (support et caméra), afin de diminuer l'intensité des vibrations mécaniques se répercutant sur l'instabilité de l'image. La répercussion du moindre mouvement du support sur la caméra devient considérable en longue focale. Il se conçoit aisément que la rigidité du support diminue fortement l'influence des vibrations sur la qualité de l'image mais elle ne les élimine pas complètement. Un dispositif stabilisateur de caméra est alors utilisé pour la fixation de celle-ci sur son support. Ces dispositifs peuvent être complétés par un système de stabilisation interne à la caméra.

⇒ **Inclinaison du détecteur**

L'inclinaison du détecteur est une fonction de la distance et de la hauteur de la caméra (orientation de la caméra vers la piste), mais il faut également tenir compte de l'inclinaison de la piste. En effet, l'inclinaison doit être telle que la surface de piste à surveiller soit suffisante pour permettre une détection efficace.

De manière théorique, considérant que les pentes de pistes recommandées ne doivent pas dépasser 2% (source ITAC), l'inclinaison du détecteur ne devrait pas descendre en dessous d'une valeur de 1,2° par rapport à l'horizontale, faute de quoi, une partie de la piste pourrait ne pas être vue (à moins d'implanter une autre caméra en regard). En réalité, il faut prendre en compte la géométrie de la chaussée (pente en toit, déformations de chaussée, topographie du terrain, pente supérieure aux recommandations, etc.). Cette inclinaison se fait au cas par cas.

⇒ **La surface de piste de détection**

La surface de piste couverte par un détecteur dépend de son champ visuel (ou FOV Field of View) qui est fonction des caractéristiques techniques du détecteur (dimensions du capteur photosensible, focale) [5]. Le calcul de ce champ de vision s'obtient à partir des caractéristiques de la caméra et inversement le dimensionnement de la caméra (c'est-à-dire le choix de ses caractéristiques) s'obtient à partir de la donnée du champ visuel et par conséquent de la surface de piste à observer.

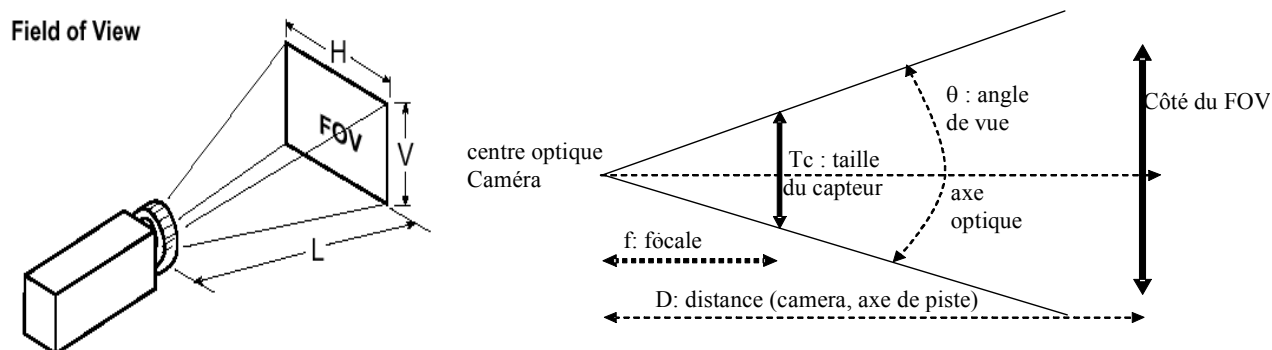


Figure 24 : Champ de vision d'une caméra

La valeur du FOV s'obtient de la manière suivante :

$$\text{Côté_du_FOV} = \frac{Tc \times D}{f}$$

Les deux côtés du FOV sont différents dans le cas d'un capteur de surface rectangulaire. Le FOV est parfois assimilé à l'angle de vue.

L'angle de vue est alors

$$\theta = \arctan\left(\frac{Tc}{f}\right)$$

Deux angles de vue sont définis (θ_h , θ_v), pour les côtés H et V du FOV, lorsque le capteur photosensible est de forme rectangulaire. Ainsi, la surface de piste de détection est entièrement déterminée par la donnée des angles de vue θ_h et θ_v .

Pour une caméra donnée et fixe, si l'on veut pouvoir détecter un objet de petite taille de dimensions nettement inférieures à celle de la piste, il faut pouvoir augmenter la distance focale (ie. effectuer un zoom) et par conséquent cela revient à diminuer l'angle de vue θ_h , c'est à dire la longueur de piste observée. Donc, à longueur de piste égale à surveiller, l'augmentation de la sensibilité et de la résolution du système revient à devoir augmenter le nombre de caméras ou à les rendre mobiles.

Cependant, l'augmentation du nombre de détecteurs présente un inconvénient au niveau de la maintenance des équipements. En cas de dysfonctionnement, le nombre d'interventions sur le terrain peut devenir élevé.

Ainsi que précisé auparavant, la longueur de piste couverte par un détecteur, peut être augmentée en utilisant des caméras mobiles autour de leur axe de fixation. Ce qui réduit la quantité de caméras à installer, mais nécessite l'utilisation de focales variables en continu pour la mise au point sur les objets détectés, ceci n'est pas sans conséquence sur la maintenance des équipements. Cela introduit également un cycle de détection.

↳ Généralités sur les méthodes d'analyse des images

Cette partie de l'étude est consacrée aux méthodes informatiques utilisées dans la couche traitement des systèmes de détection optique des objets sur les pistes. Il s'agit de quelques-unes des méthodes utilisées pour le traitement d'images car les développements dans ce domaine sont en perpétuelle progression.

⇒ **Traitement d'images**

Pour la détection d'un objet sur une piste, le traitement informatique des images peut se décomposer selon les étapes suivantes :

- le prétraitement de l'image ;
- la localisation des zones à traiter ;
- l'analyse de l'image ;
- l'information.

Le prétraitement consiste à préparer l'image initiale pour faciliter les opérations qui suivent. Il s'agit soit de compenser les divers défauts dont l'image pourrait être entachée (bruit, manque de contraste, déformations géométriques, aberrations chromatiques, netteté,...), soit de mettre en évidence les contrastes intéressants ou au contraire de réduire les contrastes indésirables. Les prétraitements s'appliquent à des images et fournissent normalement de nouvelles images au contenu modifié. Ils permettent dans une certaine mesure de réduire ou d'éliminer des causes d'erreurs accidentelles ou systématiques qui conduiraient à la création d'une fausse alarme ou au contraire à l'absence de détection.

La localisation est la partie essentielle des opérations de traitement d'images. Il s'agit de trouver dans les images les éléments intéressants (sections homogènes de l'image) et de les délimiter, ces éléments peuvent être :

- soit inconnus à l'avance, auquel cas il est effectué une segmentation de l'image par zone homogène suivie d'une sélection des segments utiles ;
- soit connus à l'avance par un modèle, ou extrait d'une image de référence, ou donné sous une forme synthétique.

Selon les cas, il s'agira respectivement d'une localisation grossière ou au contraire la localisation sera l'objet principal du traitement. A l'issue de la phase de localisation, les emplacements des éléments à analyser seront connus et ainsi que les pixels qui seront impliqués dans les mesures. Les ensembles de pixels ainsi délimités sont appelés régions ciblées. Ces dernières peuvent être des figures géométriques simples (fenêtres rectangulaires, circulaires ou polygonales, et combinaisons de celles-ci), ou correspondre à des formes extraites de l'image elle-même (segments).

Pour localiser dans l'image les régions intéressantes pouvant donner lieu à la détection d'un objet, trois méthodes peuvent être appliquées.

La première méthode consiste en l'appariement de modèle : une comparaison est faite par superposition entre une image de référence et l'image inspectée, il s'agit d'une méthode de comparaison surfacique, où l'on compare deux à deux tous les pixels du modèle et de la cible.

La seconde méthode se rapporte à la détection de contours: pour localiser des objets, il s'agit de s'appuyer sur leur forme. Celle-ci est délimitée par leurs contours, c'est-à-dire les lieux de l'image où les variations de niveaux de gris sont les plus importantes dans le cas d'une image noir et blanc.

La troisième méthode correspond à la segmentation : lorsque le contenu de l'image est très mal connu à l'avance, il est nécessaire d'avoir recours à des méthodes générales pour isoler des objets. La segmentation consiste à délimiter dans l'image des régions dont le contenu est homogène, telles que des zones uniformes, des zones texturées, l'arrière-plan plus sombre. La technique de segmentation la plus répandue est l'analyse des pixels par comparaison à un niveau de seuil (forcé appartient au fond, clair appartient à l'objet), puis on regroupe les pixels contigus de même type. On forme ainsi des taches dont on peut estimer la position par détermination du centre. Cette approche a le mérite de la simplicité, mais elle est prise en défaut lorsqu'il existe de faibles variations de niveau de gris.

Les moyens de localisation permettent de trouver dans l'image les régions ciblées. La connaissance de leur géométrie permet alors de définir des zones à mesurer. Toute la difficulté consiste en leur quantification : c'est ce qui concerne les techniques d'analyse et de mesure qui ont pour tâche d'évaluer :

- la couleur, en terme de niveaux de gris ou de composantes colorées ; pour cela, des statistiques sur des ensembles de pixels sont utilisées : valeur moyenne, minimum, diamètre du nuage de points, histogrammes ;
- la taille et la forme ;
- la position : les techniques de localisation telles que l'appariement de modèle ou la détection de contours.

L'analyse exploite les résultats de la localisation et a pour but de réduire à une petite quantité de paramètres l'information à traiter. Par exemple, les objets seront décrits par un petit nombre de paramètres de taille ou de forme en vue de les reconnaître ; l'intensité lumineuse moyenne à l'intérieur d'une petite zone pourra être mesurée pour déterminer l'absence ou la présence de matière à cet endroit.

L'information est la conclusion du traitement d'images. Elle exploite les valeurs des paramètres analysés pour émettre un résultat tel que : un objet est présent ou absent. Une décision est alors prise par le logiciel dans le cas de la présence d'un objet et donne lieu à la production d'une alarme.

En principe, les différentes étapes évoquées se succèdent au cours du traitement, mais il arrive que des retours en arrière aient lieu.

Les méthodes précédentes de traitement d'images sont cependant sensibles à des défauts tels que la distorsion optique qui modifie localement les facteurs d'échelle (correspondance entre les dimensions d'un pixel et la portion du champ visuel qu'il couvre effectivement sur l'objet observé). Pour pallier ces défauts, il est nécessaire de mettre en œuvre une méthode de calibration géométrique. La calibration est mise en œuvre au moyen de mires ou de tout objet dont les dimensions sont connues avec précision et qui peuvent être mesurées facilement par le système d'imagerie.

⇒ **Le modèle de caméra**

La modélisation d'une caméra consiste à exprimer le lien entre les points de l'image formée par la caméra avec les points de la scène observée, ceci en fonction de paramètres inhérents à la caméra (paramètres intrinsèques – dimensions du capteur, focale-) et de la configuration relative caméra / scène (paramètres extrinsèques – inclinaison de la caméra, distance caméra-scène).

Cette modélisation permet de résoudre à la fois le problème de positionnement d'un objet par rapport à une caméra, celui du calcul du mouvement de la caméra et sa calibration [6]. Le modèle de caméra le plus utilisé est le modèle sténopé. Il s'appuie sur l'algèbre matricielle, permettant ainsi de relier les coordonnées 3D d'un objet situé dans la scène observée avec les coordonnées 2D de cet objet dans l'image perçue.

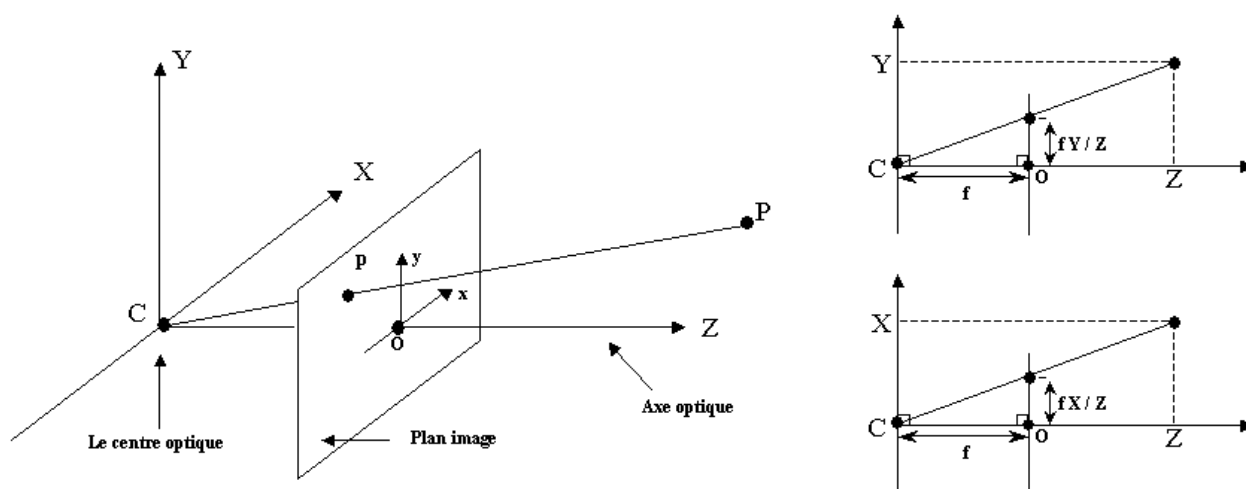


Figure 25 : Géométrie du modèle de caméra (où C est le centre optique de la caméra et O le centre du capteur photosensible [7])

Note : ce modèle, utilisé dans la mise au point d'outils d'exploitation d'images numériques par le LCPC, permet d'effectuer des mesures sur chaussées et notamment la détection du marquage sur route. Les perspectives affichées par ces outils sont aussi la détection d'objets sur chaussée par stéréovision (utilisation de deux caméras ou plus) [25].

6.3.2.2 Les systèmes de détection radar

↳ Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un radar est de capter le signal électromagnétique réfléchi par une cible (écho). La puissance reçue par le système est régie par l'équation du radar qui dépend de ses paramètres internes comme le gain des antennes et la puissance délivrée par le radar mais aussi de la distance à la cible et du pouvoir réfléchissant de celle-ci sous l'angle d'observation considéré. Cette dernière notion est appelée surface équivalente radar (SER) ou RCS (Radar Cross Section) en anglais. L'expression de l'équation radar est établie pour un milieu sans perte de puissance. Dans le cas d'un milieu avec pertes, cette équation doit être pondérée d'un facteur de pertes qui, dans le cas de la détection d'objets étrangers, est lié aux conditions atmosphériques.

↳ Le détecteur radar

Le radar utilisé dans cette technique de détection est constitué d'un ensemble d'éléments comportant :

- une antenne ;
- un émetteur ;
- un récepteur ;
- une unité de traitement du signal.

⇒ L'antenne

Elle a pour fonction de concentrer l'énergie électromagnétique associée à l'onde émise dans une direction donnée. Cette direction est définie par la nature de l'antenne (sa géométrie et sa composition). Cette dernière peut être équipée d'un système mécanique de rotation permettant de changer son orientation et ainsi

d'augmenter le champ d'exploration du radar. Elle peut être aussi utilisée pour récupérer le signal réfléchi par l'objet. Il s'agit alors d'une antenne émettrice-réceptrice. Les antennes d'émission et de réception peuvent être dissociées (on parle alors de configuration bistatique).

⇒ **L'émetteur**

L'émetteur est l'élément du radar qui génère l'onde électromagnétique, il est dirigé vers l'antenne. Le signal émis se réfléchit en premier sur la surface de celle-ci, puis est orienté vers l'objet à détecter.

⇒ **Le récepteur**

Le récepteur est la partie du radar qui a pour fonction de recueillir le signal réfléchi par l'objet, de l'amplifier sans distorsion et d'effectuer un traitement électronique du signal (filtrage, élimination du bruit électronique) ainsi que les autres traitements adaptés à l'information à obtenir (par exemple distance, position angulaire).

⇒ **L'unité de traitement du signal**

Le traitement du signal reçu par le radar s'effectue à partir du signal fourni par le récepteur mis en forme par les circuits électroniques associés au bloc antenne. Le bloc de traitement numérique du signal ou DSP est l'unité de traitement du signal dont la fonction est d'extraire de la totalité du signal en provenance de la piste, le signal indiquant la présence d'un objet.

⇒ **Equation du radar**

Comme indiqué précédemment, la puissance reçue par l'antenne de réception dans un milieu sans pertes est donnée par l'équation du radar :

$$P_r = P_e \cdot G_1(\vec{u}_1) \cdot G_2(\vec{u}_2) \cdot \frac{\lambda^2 \cdot \sigma(\vec{u}_1, \vec{u}_2)}{(4\pi)^3 \cdot R_1^2 \cdot R_2^2}$$

où chaque terme de cette équation correspond à :

- P_r : puissance reçue par le radar ;
- P_e : puissance d'émission du radar ;
- $G_1(\vec{u}_1)$: le gain de l'antenne d'émission dans la direction $\vec{u}_1$ vers une cible située à une distance R_1 ;
- $G_2(\vec{u}_2)$: le gain de l'antenne de réception dans la direction $\vec{u}_2$ et située à une distance R_2 de la cible ;
- λ : la longueur d'onde de travail ;
- $\sigma(\vec{u}_1, \vec{u}_2)$: la surface équivalente radar vue dans la direction $\vec{u}_2$ pour une illumination $\vec{u}_1$;
- R_1 et R_2 : les distances entre la cible et respectivement l'émetteur et le récepteur.

La figure suivante illustre l'équation radar. La configuration est dite bistatique dans le cas où les angles de vue entre l'émission et la réception sont différents (figure 26). Si une seule antenne est utilisée, la configuration est dite monostatique comme illustré en figure 27, l'équation radar se simplifie:

$$P_r = P_e \cdot G(\vec{u})^2 \cdot \frac{\lambda^2 \cdot \sigma(\vec{u})}{(4\pi)^3 \cdot R^4}$$

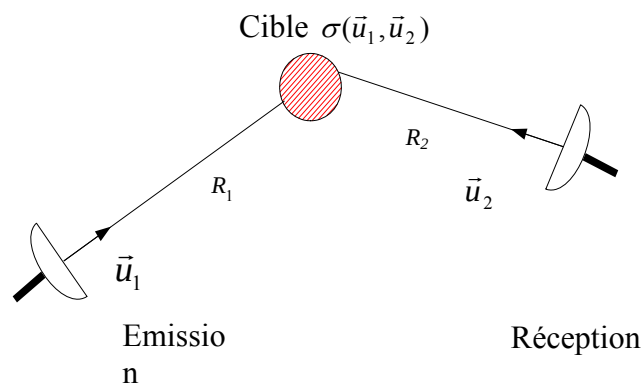


Figure 26 : Configuration radar bistatique

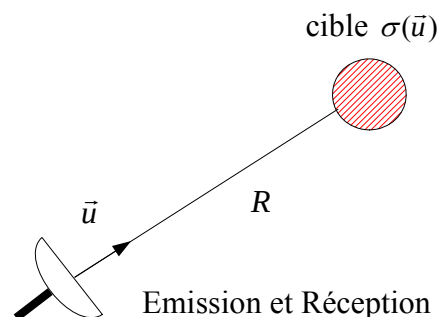


Figure 27 : Configuration radar monostatique

Dans le cas d'un radar utilisant deux antennes proches destinées à détecter des cibles éloignées, les angles de vue en émission et réception sont pratiquement confondus. On parle alors de monostatique ou de bistatique faible.

⇒ **Surface équivalente radar (SER, notée σ)**

Par définition, la SER d'une cible est la surface équivalente qui correspond à l'aire de la section droite ($\pi \cdot r^2$) d'une sphère métallique qui renverrait le même écho dans la direction d'observation.

La surface équivalente radar d'un objet est une grandeur dont la détermination analytique est complexe. Sa valeur dépend de plusieurs paramètres

- la forme de l'objet ;
- l'angle de vue, c'est-à-dire le couple $(\vec{u}_1, \vec{u}_2)$;
- le ou les matériaux qui composent l'objet ;
- la taille de l'objet par rapport à la longueur d'onde et la polarisation de l'onde incidente.

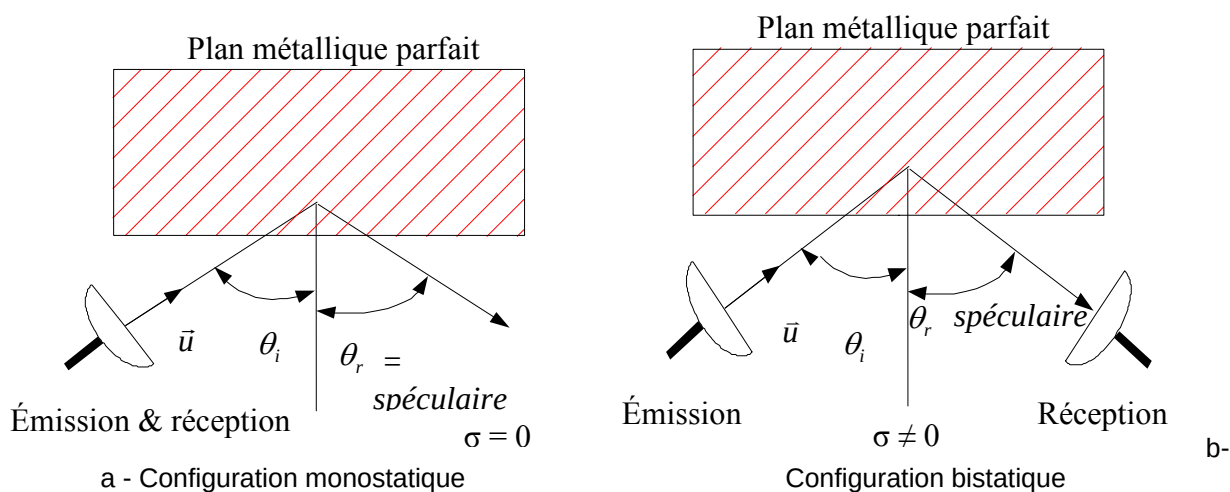
⇒ **Forme de l'objet**

Une façon simple d'illustrer la dépendance de la SER en fonction de la forme de l'objet est de considérer une sphère et un cylindre métalliques de section circulaire. La surface de coupe d'une sphère selon son diamètre ne dépend pas de l'angle de coupe. En revanche, la surface de coupe d'un cylindre dépend de cet angle, on obtient par exemple un cercle ou un rectangle.

⇒ **Angle de vue**

Dans le cas des objets précédents, la surface physique dépend de l'angle de vue. Un autre aspect de cette dépendance est lié au positionnement des antennes. Dans le cas simple d'un plan métallique infini, lorsque l'onde incidente n'est pas en incidence normale ($\theta=0$), l'onde réfléchie se propage dans la direction spéculaire. Ceci implique qu'une configuration monostatique ne permet pas de la détecter (figure 28.a). En revanche, placer l'antenne de réception dans cette direction spéculaire produira une SER maximale (figure 28.b). En pratique, les objets sont plus complexes que le plan et possèdent une SER plus ou moins faible dans la direction de l'onde incidente. Une configuration monostatique peut alors permettre de détecter un signal. Cet

aspect doit cependant être considéré dans la limite de détection du radar car sous certains angles, les objets peuvent être furtifs ($\sigma = 0$).



⇒ Matériaux

Les matériaux ne possèdent pas tous le même pouvoir réfléchissant. Certains d'entre eux sont même très absorbants, et par conséquent à faible SER.

⇒ Taille de l'objet par rapport à la longueur d'onde et polarisation de l'onde incidente

Un même objet peut présenter une SER différente selon la longueur d'onde utilisée. Selon l'étude du LEAT, la détection des lignes à haute tension a montré, de manière théorique [8] et expérimentale [19], que dans le domaine millimétrique, les signaux réfléchis en polarisation verticale et horizontale sont du même ordre de grandeur car l'onde voit un objet de grande taille ce qui n'est pas le cas en basses fréquences.

Le calcul rigoureux de la SER s'effectue par la résolution des équations de Maxwell. Cependant il est possible de déterminer les valeurs de la SER d'objets simples. Le tableau suivant résume les valeurs trouvées pour des objets simples métalliques parfaitement conducteurs calculées à partir de [21].

Sphère de rayon a	Cylindre de rayon a et de hauteur l	Plan ($a \times b$)	Réflecteur trièdre
$\sigma = \pi \cdot a^2$	$\sigma = a\lambda \frac{\cos \theta \cdot \sin^2(kl \theta \sin \theta)}{2\pi \sin^2 \theta}$ incident sur la tranche $\sigma_{\max} = 2\pi \frac{a \cdot l^2}{\lambda}$ incidence normale	$\sigma_{\max} = 4\pi \frac{a^2 b^2}{\lambda^2}$ incidence normale	$\sigma = 4\pi \frac{a^4}{3\lambda^2}$

Tableau 1 : SER d'objets simples

⇒ **Portée et sensibilité de la détection d'un radar**

Le principe de fonctionnement d'un radar est de détecter l'intervalle de temps (τ) entre lequel, le signal a été émis, et celui réfléchi par la cible située à une distance R. Cette différence correspond à un aller-retour de l'onde:

$$\tau = 2 \frac{R}{c}, \text{ où } c \text{ est la vitesse de la lumière.}$$

La détermination de cet intervalle de temps (τ) dépend du type de radar.

Dans le cas des radars FMCW, utilisé par un des systèmes étudié, le signal émis est modulé en fréquences selon une loi prédéfinie, par exemple, une modulation en dent de scie comme reporté en figure 29. La différence entre la fréquence émise et la fréquence reçue est directement liée au retard dû à l'aller-retour effectué lors de la détection de la cible [22]. Cette différence de fréquence est appelée fréquence de battement (f_{bat}).

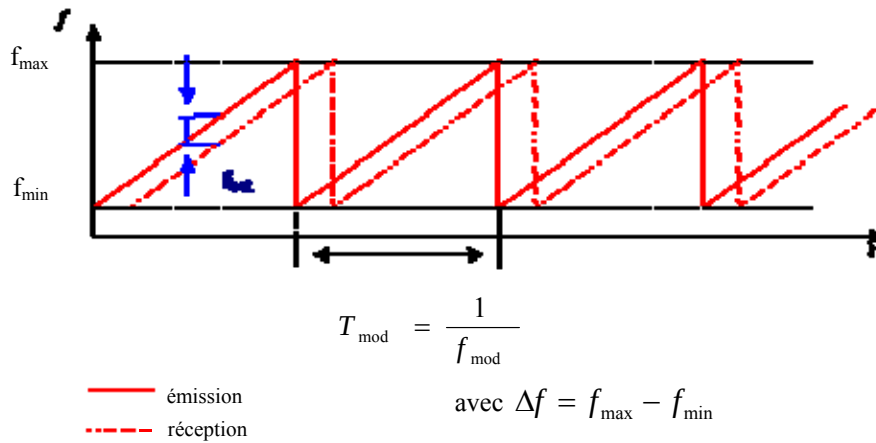


Figure 29 : FMCW à modulation en dents de scie

⇒ **Définition de la fréquence de battement**

$$f_{bat} = \frac{4.R.f_{mod}.\Delta f}{c}$$

où :

- Δf : bande passante du radar ;
- f_{mod} : fréquence de modulation.

⇒ **Portée du radar FMCW**

D'après ce qui précède, la portée du radar est la distance maximale de détection :

$$R_{max} = \frac{c.f_{bat}}{4.f_{mod}.\Delta f}$$

La dynamique de détection du radar (différence entre $R_{\min}$ et $R_{\max}$) est d'autant plus élevée que l'excursion sur f_{bat} est grande. Inversement, elle sera réduite si la fréquence de modulation ou la bande passante Δf est élevée. En règle générale, le système est conçu de manière à obtenir des valeurs de T_{mod} et Δf_{bat} importantes tout en maintenant Δf élevée afin de ne pas dégrader la résolution en distance du radar.

Le radar FMCW est particulièrement sensible d'une part aux défauts de linéarité de ses composants. C'est le facteur interne qui limite la portée du radar c'est-à-dire tout facteur ne dépendant pas de l'objet à détecter. L'ensemble des non linéarités ne doit pas excéder 0,1% [21]. D'autre part, le bruit de phase et la présence d'harmoniques générés lors de la conversion de fréquences dégradent la pureté spectrale du signal. Les harmoniques parasites génèrent le fouillis radar (clutter) alors que le bruit de phase réduit la dynamique de détection et risque de « noyer » les signaux reçus diffractés par des cibles secondaires.

⇒ Résolution

La limite physique de la résolution correspondant à une demi-longueur d'onde est en pratique inférieure aux limitations liées à l'architecture du capteur. La figure 30 représente le faisceau d'observation du radar lorsque celui-ci pointe dans la direction θ . Les axes Ox, Oy, Oz sont choisis de façon à ce que l'angle $\theta = (\text{Oz}, \text{direction d'observation})$ corresponde à la direction de propagation. Dans cette configuration, le plan horizontal est le plan (xOz) et le plan vertical le plan (yOz). L'ouverture du faisceau de l'antenne du radar à - 3 dB en élévation (coupe verticale) est notée $\Delta\theta_{el}$ et celle en azimuth (coupe horizontale) est notée $\Delta\theta_{az}$.

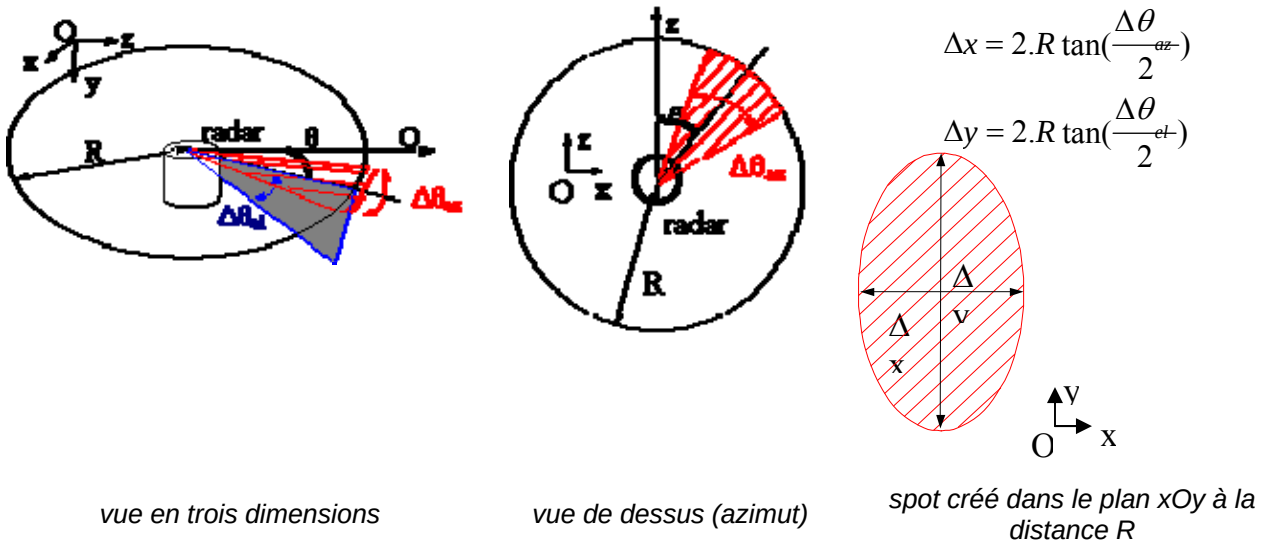


Figure 30 : Faisceau d'observation

Vue de dessus la zone couverte par l'antenne est une portion de disque centrée autour de l'angle d'observation θ et de largeur angulaire $\Delta\theta_{az}$. La tache radar correspondante à la distance R dans le plan (xOy) est une ellipse de grand axe $\max(\Delta\theta_{az}, \Delta\theta_{el})$ et de petit axe $\min(\Delta\theta_{az}, \Delta\theta_{el})$. C'est la résolution du balayage du radar dans ce plan et est fonction de l'antenne choisie. La résolution en profondeur, encore appelée résolution en distance (range resolution) dépend du système, pour un radar FMCW elle est donnée par :

$$\Delta R = \frac{c}{2\Delta f}$$

Le tableau suivant ainsi que la figure 31 résument l'ensemble des paramètres permettant de calculer la résolution, c'est-à-dire le pouvoir séparateur du radar :

Résolution en distance
(Range resolution)

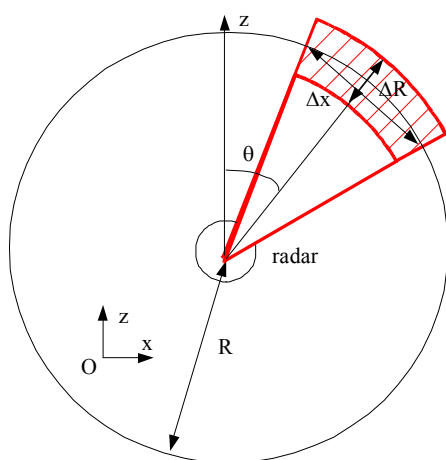
$$\Delta R = \frac{c}{2\Delta f}$$

Résolution en y

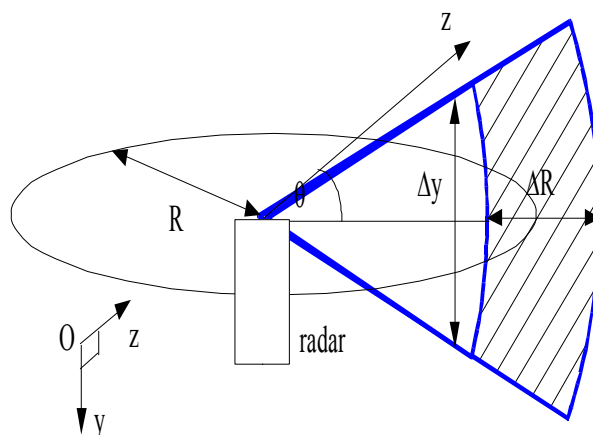
$$\Delta y = 2R \tan\left(\frac{\Delta\theta_{el}}{2}\right)$$

Résolution en x

$$\Delta x = 2R \tan\left(\frac{\Delta\theta_{az}}{2}\right)$$



Résolution en azimuth



Résolution en élévation

Figure 31 : Résolution en azimuth et élévation

⇒ La sensibilité aux conditions atmosphériques

La plupart des longueurs d'ondes millimétriques présente un fort coefficient d'absorption par les composantes de l'atmosphère, tels l'oxygène et la vapeur d'eau, contrairement à la fréquence de 94 GHz qui correspond au meilleur compromis. A ce titre, la fréquence 94 GHz (94,5 GHz) est et a été utilisée pour construire des radars millimétriques longue portée (type. 1 à 2 km) [23] et [24].

6.3.2.3 Les systèmes de détection lidar

⇒ Principe de fonctionnement

La détection à distance d'objets se base sur la mesure du temps de parcours d'une impulsion laser pour effectuer l'aller et le retour entre le détecteur et l'objet désigné.

Le fonctionnement d'un lidar infrarouge fait intervenir les éléments suivants :

- une source laser émettant des impulsions brèves à une cadence de quelques tirs par seconde ou en coup par coup. Une faible fraction du flux émis par le laser est prélevée immédiatement en sortie du laser et captée par le récepteur et dont le signal permet de définir l'instant de départ de l'impulsion.

- un dispositif d'orientation du faisceau ou déflecteur de faisceau qui est chargé de diriger le rayon laser sur la zone à analyser et d'en assurer le balayage angulaire. Pour chaque direction visée, la mesure de la distance du point d'impact du faisceau laser, associée à la connaissance de ses coordonnées angulaires, permet de constituer une cartographie en 3 dimensions du paysage environnant, de laquelle ressortiront les objets éventuels, grâce à leur contraste vis-à-vis du fond.
- un système optique d'émission qui a pour but de mettre en forme le faisceau pour adapter sa divergence angulaire à la dimension de l'objet.
- un photodétecteur dont la surface photosensible est conçue de telle sorte que les signaux en réception et en émission n'interfèrent pas l'un à l'autre, mais aussi pour limiter le bruit propre du photodétecteur. Un verre filtrant équipe le photodétecteur pour limiter la bande spectrale du récepteur autour de la longueur d'onde du laser et pour optimiser la sensibilité du détecteur.

Les lidars, tout comme les ladar, possèdent un fonctionnement analogue à celui des radars. Alors que les radars envoient des ondes radios, les lidars et ladar travaillent dans le domaine de l'ultraviolet ou l'infrarouge. Pour mémoire, les trois sous domaines de l'infrarouge sont :

- proche : $0,7-5\mu\text{m}$;
- moyen : $5-30\mu\text{m}$;
- lointain : $30-100\mu\text{m}$.

Il existe deux grandes familles de lidar et ladar qui se distinguent par le mode de détection rappelé en figure 64:

- la détection directe : le signal délivré par le détecteur, le photodétecteur en l'occurrence, est proportionnel à l'intensité lumineuse de l'onde diffractée par l'objet ;
- la détection cohérente : le signal reçu par le capteur est mélangé à un signal de référence prélevé à l'émission, de cette manière, la phase et l'amplitude du signal reçu interviennent dans le mécanisme de détection.

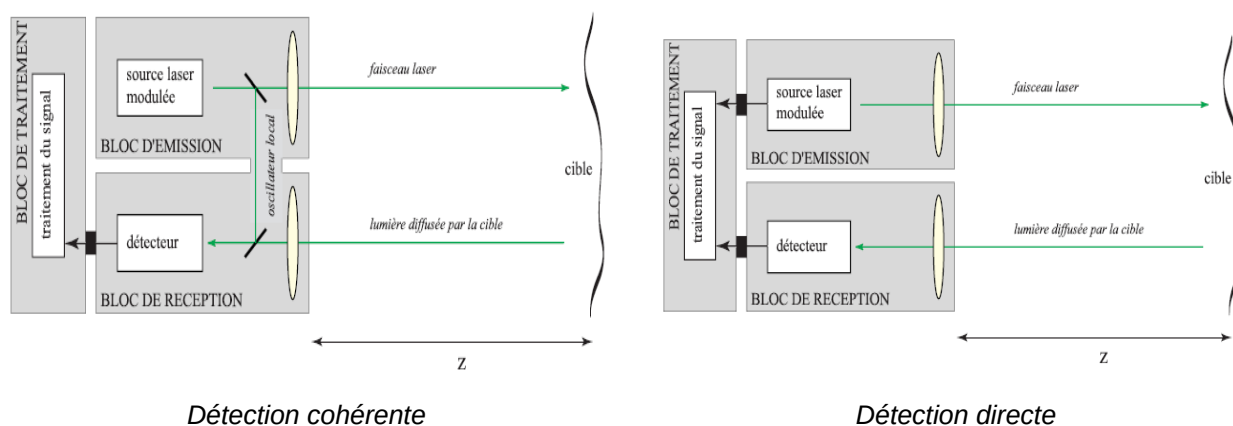


Figure 32 : Les principes de détection lidar [20]

Le détecteur lidar

Les composants d'un détecteur sont :

- un émetteur, qui est une source laser infrarouge équipée d'un élément de commande du faisceau laser agissant sur son intensité ;

- un séparateur de faisceau (entre le faisceau émis et réfléchi par l'objet) dans le cas d'un lidar monostatique ;
- un système d'asservissement angulaire du faisceau pour un balayage systématique ou non de la zone d'observation ;
- une série de filtres optiques pour éliminer les sources de parasitage du signal réfléchi ;
- un récepteur qui est un photodétecteur dont le rôle est de convertir en signal électrique, la fraction du flux laser diffusé par l'objet ;
- une électronique de traitement du signal (analogique et numérique).

L'émetteur et le récepteur peuvent être soit liés l'un et l'autre (lidar dit monostatique), soit indépendants l'un de l'autre (lidar bistatique). Le système identifié lors de cette étude est un lidar monostatique.

Quel que soit le type de lidar, monostatique ou bistatique, celui-ci illumine donc l'objet à l'aide d'un pinceau lumineux étroit et capte en retour le flux réfléchi par l'objet grâce au récepteur, dont l'axe est pointé sur l'objet.

↳ Critères de performances

Les performances du détecteur dépendent de nombreux paramètres parmi lesquels on peut citer :

- les propriétés de réflexion de l'objet visé ;
- les propriétés en transmission du milieu de propagation (absorption, diffusion, turbulence) ;
- les caractéristiques de la source laser (bande spectrale, longueur d'onde, etc.) ;
- le type de traitement du signal, en fonction de l'information recherchée.

Selon les informations recherchées sur l'objet à détecter, l'optimisation des performances du détecteur passe par l'amélioration du rapport signal sur bruit. Il s'agit alors d'optimiser le signal en provenance de l'objet, et pour cela un choix de l'illuminateur sera effectué en fonction des caractéristiques des objets et du milieu de transmission.

De façon générale, l'évaluation des performances d'un radar laser concerne l'ensemble ou une partie des points suivants:

- sa portée, c'est-à-dire la distance limite au-delà de laquelle le système ne remplit plus de façon satisfaisante les fonctions demandées ;
- la précision des mesures, par exemple, en distances, ou angles ;
- la résolution, c'est-à-dire l'aptitude à discerner la présence de plusieurs cibles proches l'une de l'autre en distance ou direction ;
- la cadence des informations reçues ;
- le conditionnement du système (notamment limiter l'humidité, etc.).

Pour évaluer la portée d'un lidar sur un objet, une procédure couramment utilisée est basée sur le calcul du signal laser en provenance de l'objet considéré et sur la détermination du rapport signal sur bruit en fonction de la distance. Le calcul du signal laser s'effectue à partir de lois générales de l'optique géométrique, pour des objets de dimensions supérieures à la « tache » laser sur l'objet. Dans le cas où le faisceau laser est de dimensions supérieures à celles de l'objet, la technique de calcul est identique à celle utilisée pour les radars conventionnels.

A partir du calcul sur la valeur du signal reçu, l'évaluation de la distance d'un objet donné (bilan de portée), s'effectue en évaluant la variation du rapport signal sur bruit du système à la sortie du photodétecteur. La portée est alors la distance de l'objet pour laquelle le rapport signal sur bruit atteint une valeur limite imposée

par les spécifications du système (en particulier, sur les probabilités de détection de l'objet et de fausse alarme).

Dans la pratique, les performances réelles d'un lidar sont établies à partir des valeurs expérimentales des paramètres de base (puissance d'émission laser, la réflexion de l'objet, la transmission atmosphérique, les bruits électroniques du photodétecteur et des circuits de traitement du signal,...).

Si l'on considère par exemple uniquement la réflexion de l'objet, un coefficient de réflexion doit être pris en compte et dépend non seulement de la nature et de la forme de l'objet, mais aussi de l'état de sa surface (lisse, rugueux, sec, humide, présence de dépôts ou de peintures superficielles), de l'angle sous lequel il se présente, etc.

Pour un objet donné, il est établi expérimentalement la valeur de la « surface orientée » de l'objet par rapport au faisceau laser. Cette caractérisation est indispensable car elle permet de déduire non seulement le comportement moyen de l'objet sous « illumination » laser (la valeur de la surface orientée de l'objet correspondant à l'intensité maximale du signal réfléchi), mais aussi les fluctuations de sa réponse laser (le signal réfléchi) dont la connaissance est essentielle pour l'établissement d'un bilan réaliste (probabilités de détection différentes sur cibles fixes et mobiles).

Comme il a été indiqué plus haut, le milieu de propagation peut dégrader le faisceau laser, en l'atténuant et en le déformant (turbulence).

Dans le proche infrarouge, la transmission atmosphérique au sol du faisceau laser est très fortement liée à la distance de visibilité météorologique. Dans l'infrarouge lointain, la diffusion du faisceau laser est fortement perturbée par l'absorption due à l'humidité de l'air.

En présence de turbulences, les faisceaux lasers n'obéissent plus aux lois classiques de la propagation dans les milieux homogènes, ce qui se traduit, pour le faisceau laser, par :

- des fluctuations du faisceau autour de la direction de propagation ;
- des variations sur la divergence (taille du faisceau) et l'intensité de la tache laser.

6.3.2.4 Tableau comparant les différentes technologies de détection

Le tableau suivant présente les sensibilités des différentes technologies de détection, en fonction de l'objet à détecter, de la position du détecteur et des conditions environnementales (météorologie, visibilité et période de la journée) :

- ++ forte sensibilité ;
- + sensibilité moyenne ;
- / insensible.

Famille	Radar	Lidar	Caméra IR	Caméra CCD
Objet				
taille	++	++	++	++
forme	++	+	+	+
couleur	/	/	/	++
composition	++	++	++	+
Position				

Famille	Radar	Lidar	Caméra IR	Caméra CCD
éloignement	++	++	++	++
orientation	++	+	/ si IR passif + si IR actif	+
Environnement				
beau temps	+	+	+	++
pluie	+	++	++	++
neige	+	++	++	++
brouillard	+	++	++	++
aube/crépuscule	/	/	+	++

Il convient de prendre un tel tableau avec toutes les précautions d'usage : la comparaison effectuée ici porte sur la capacité générique des technologies qui peuvent être encore améliorées par l'industrie ou alors affaiblies par l'emploi de composant de mauvaise qualité ou par une intégration non optimisée. Un tel tableau ne saurait être utilisé comme base de comparaison entre différents produits industriels.

7 Description et analyse des systèmes susceptibles d'être implantés sur les aérodromes

Cette partie présente les quatre systèmes identifiés dans le cadre de la recherche. Elle comporte, d'une part une description des systèmes, tels que présentés par leurs fabricants respectifs, et d'autre part une analyse critique des systèmes.

7.1 Le système QinetiQ (Tarsier)

7.1.1 - Description du système

Le système Tarsier, développé par la société QinetiQ (Royaume Uni), a été spécifiquement conçu pour la détection d'objet sur les chaussées aéronautiques.

7.1.1.1 - Principe de détection du système

Le système Tarsier s'appuie sur la technologie radar. Il repose sur une détection active utilisant un radar primaire. Le mode de détection utilisé est la détection à partir d'ondes millimétriques.

7.1.1.2 - Les composants du système

↳ Le détecteur radar

Le détecteur utilisé est un radar FMCW (Frequency Modulated Continuous Waves) dont la fréquence centrale est à 94,5 GHz, de largeur de bande 600 MHz, à double antenne (figure 38).

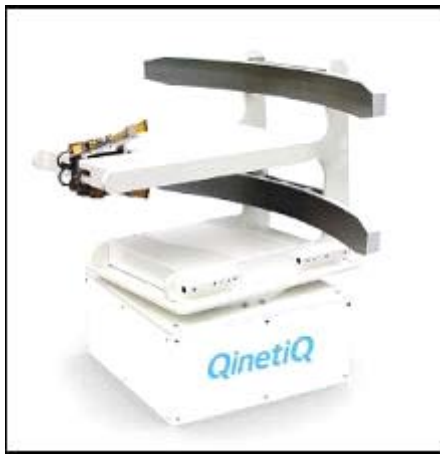


Figure 33 : Radar de détection (source QinetiQ)

Le tableau suivant résume l'ensemble de ces performances en fonction des données disponibles dans [26] ainsi que celles issues de [23]:

Centre frequency	94.5GHz
Modulation	FMCW 600MHz sawtooth
Transmit power	150mW
Sweep time	2.58ms
Transmit polarisation	RHC
Receive polarisation	RHC and LHC
Azimuth beamwidth	0.2°
Elevation beamwidth	2.0°
Scan time	3° / s typical
Range resolution	0.25m
Instrumented range	2048m
Receiver noise figure	6.5dB

Figure 34 : Paramètres du système (source QinetiQ)

L'unité de détection est placée sur une plate-forme au sommet d'un pylône en treillis (tour), à une hauteur s'échelonnant entre 7 et 9 m en fonction de la topographie du terrain d'implantation et de celle de la piste (figure 40).



Figure 35 : Le pylône et l'unité associée (source STAC)

L'ancrage au sol du pylône est réalisé au moyen d'une dalle de béton principalement conçue à cet effet. L'ensemble constitue un édifice rigide (stabilisation du détecteur).

Les détecteurs sont placés à égale distance les uns des autres parallèlement à l'axe de la piste qu'ils surveillent, et éloignés d'une distance approximative de 200 à 250 m de celle-ci (si la piste est de chiffre de code 3 ou 4). Un détecteur peut porter à plus de 1 km (toutefois, le fabricant recommande que chaque point de la zone surveillée par un radar soit situé à une distance inférieure à 1 km), rendant généralement l'installation de deux têtes suffisante. Néanmoins pour améliorer la détection, un nombre plus important de têtes radar peut être implanté. Le pylône et le détecteur sont ainsi situés sous la surface de dégagement dont la pente est de 14,3% ou 20%.

↳ Les équipements connexes

Chaque tête de détection (pylône et radar) possède une alimentation électrique de secours, en cas de défaillance du réseau électrique général, située à proximité du pylône dans un conteneur technique (figure 36).



Figure 36 : Conteneur technique (source STAC)

↳ Les équipements d'exploitation

Les éléments de détection sont complétés de deux unités informatiques. La première servant à la maintenance logicielle du système (ordinateur industriel) et la seconde à l'interface utilisateur (ordinateur de bureau).

7.1.1.3 - Architecture du système

Chaque radar est relié à un écran central par l'intermédiaire du réseau de fibres optiques de l'aéroport. Les connections entre le réseau de fibres et le réseau de câbles en cuivre s'effectuent par l'intermédiaire de convertisseurs fibre/cuivre. L'architecture du réseau (câbles, fibres optiques) constitue un réseau Ethernet.

L'architecture du système est représentée dans le synoptique suivant :

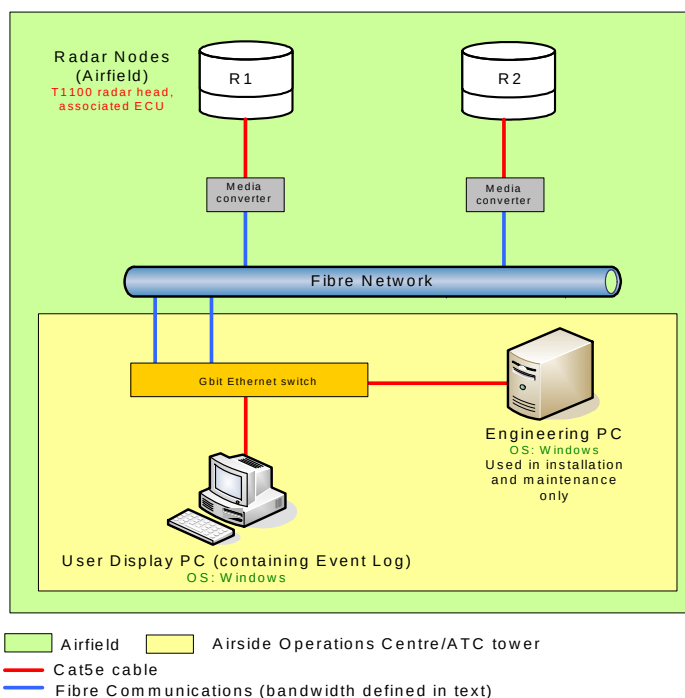


Figure 37 : Synoptique de l'installation Tarsier (source QinetiQ)

7.1.1.4 - Fonctionnement du système

↳ Principes de fonctionnement

Pour une piste de longueur 3 000 m, un nombre de deux détecteurs est suffisant (il peut être augmenté pour améliorer la couverture et les performances de la détection). Les faisceaux radars balayent sans interruption la surface totale de la piste ; ils accomplissent un balayage complet de la piste toutes les 72 secondes.

L'information en provenance de chaque radar est transmise et centralisée pour être traitée et affichée dans le cas du déclenchement d'une alarme.

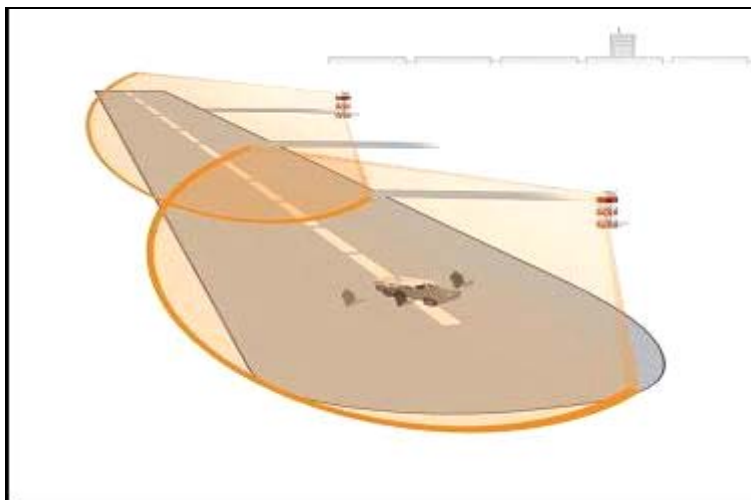


Figure 38 : Zones de détection pour une piste équipée de 2 radars (source QinetiQ)

Le système effectue une détection continue permanente, quelles que soient les conditions météorologiques, de visibilité (brouillard notamment), et de jour comme de nuit. Par ailleurs, le système Tarsier est également efficace dans la détection des objets métalliques et non métalliques tels que les pierres, les matières plastiques, synthétiques et organiques.

En cas d'alarme, le système fournit une information de localisation précise à 3 mètres près (la précision pouvant atteindre 1 mètre). Cette localisation par le système permet le ramassage rapide de celui-ci par un véhicule disponible (équipé en option d'un système de navigation GPS, le système permettant un guidage GPS jusqu'à la localisation de l'objet détecté).

↳ Les modes de fonctionnement

L'installation peut fonctionner sous deux modes actifs, en mode utilisateur lorsque l'installation est en fonctionnement normal et en mode maintenance lors de l'installation initiale et durant les opérations de maintenance.

⇒ **Fonctionnement en mode utilisateur (figure 39)**

L'interface graphique affiche un plan de l'aérodrome, contenant les pistes et sur lequel la présence des objets étrangers est indiquée à l'aide d'une icône. Le fonctionnement des radars, repérés sur le plan par une icône, y est aussi indiqué.

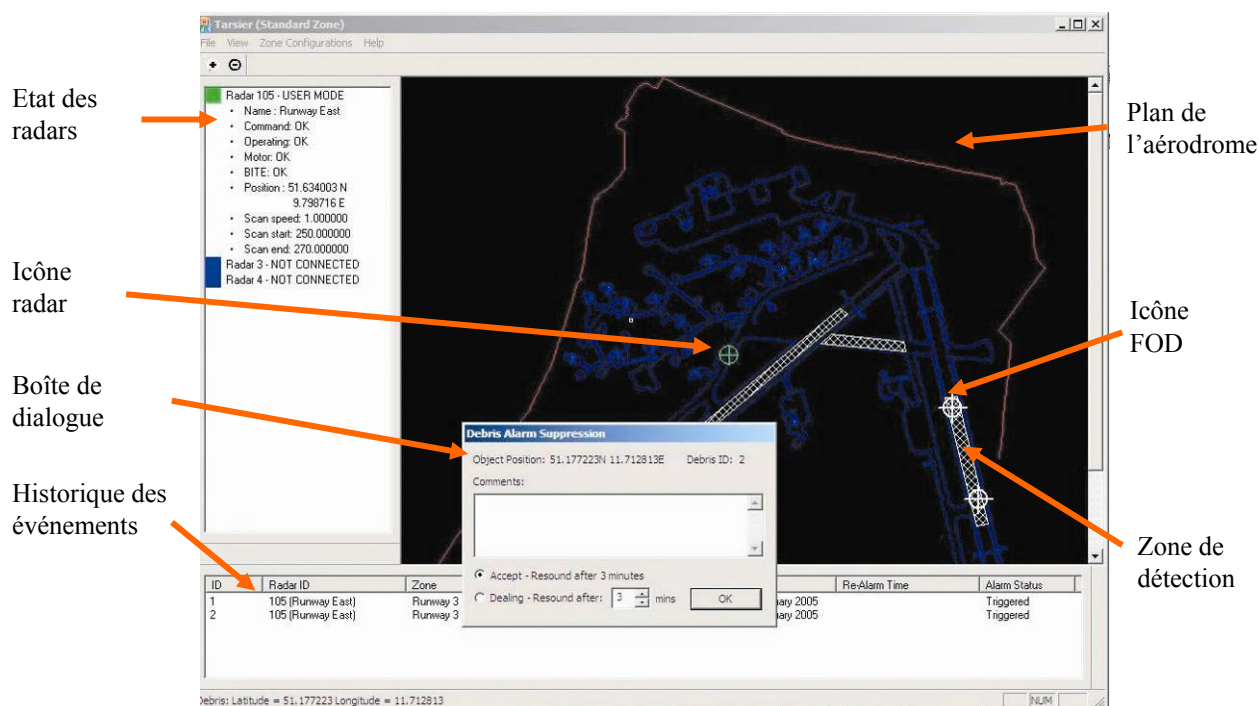


Figure 39 : Interface graphique en mode utilisateur (source QinetiQ)

A la suite de la détection d'un objet étranger, une alarme à la fois visuelle et sonore est produite. L'opérateur peut momentanément désactiver l'alarme pour saisir les informations la concernant par l'intermédiaire d'une boîte de dialogue, et ainsi valider l'événement. Le système conserve en permanence les enregistrements concernant les objets étrangers ou les informations renseignées par l'opérateur. Un historique, retraçant les événements constatés ainsi que les commentaires renseignés par l'utilisateur, garantit une traçabilité complète.

Lors du balayage de la piste par le faisceau radar, les informations obtenues sur les résultats de la détection s'affichent sur l'interface graphique restituant une image du plan du site aéroportuaire, ainsi que la position des objets détectés avec une erreur de localisation ne dépassant pas 3 m. L'indication d'un objet sur la piste est renseignée à la fois par un affichage clignotant de la position et par une alarme sonore.

⇒ **Fonctionnement en mode maintenance (Figure 40)**

Les opérations de maintenance à distance s'effectuent par l'intermédiaire d'un ordinateur industriel. Toutefois, l'accès à l'interface graphique est limité aux personnels de la société QinetiQ ainsi qu'aux personnes ayant suivi une formation et certifiées par la société. Le fonctionnement en mode maintenance est actif durant les opérations de maintenance à distance de l'installation et lors de l'installation initiale.

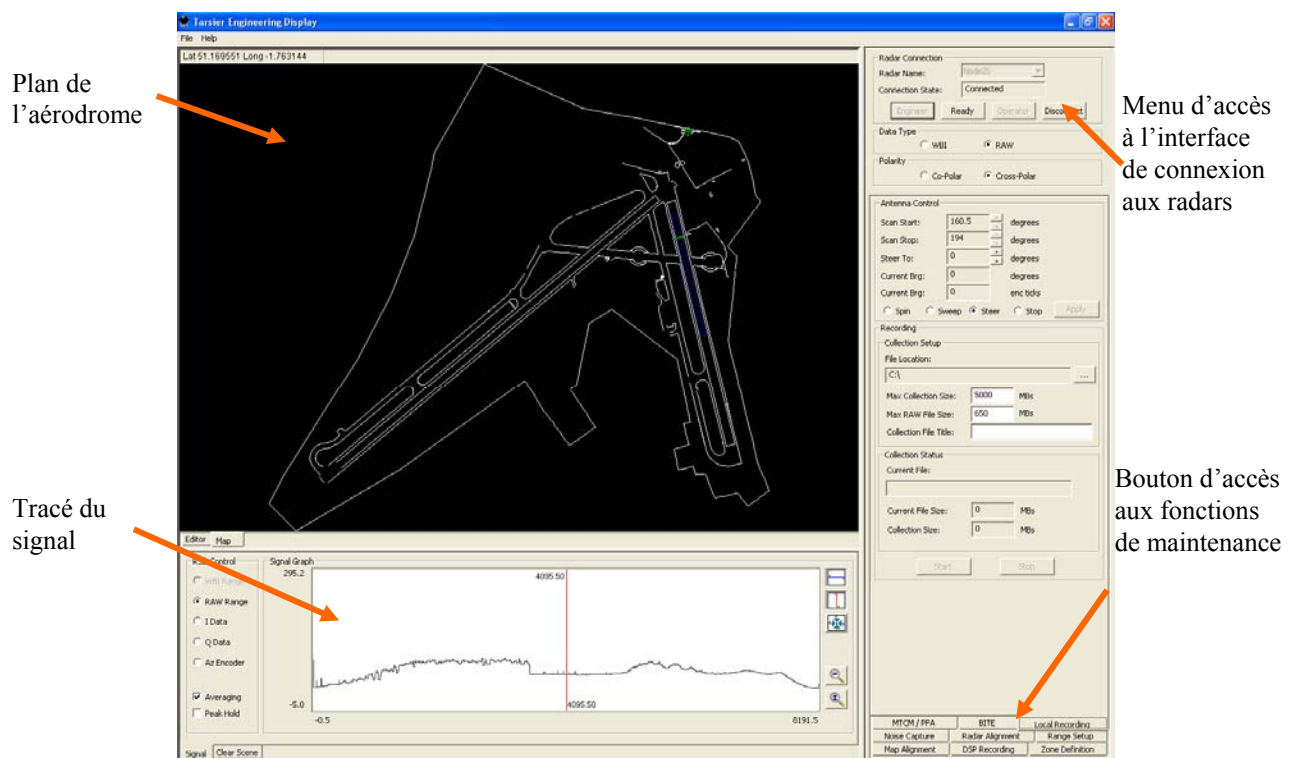


Figure 40 : Interface graphique en mode maintenance (source QinetiQ)

Image radar

L'image radar obtenue après traitement du signal restitue la portion de piste surveillée par une unité de détection, en y incluant les accotements avec une résolution de 0,25 m (figure 41).

L'antenne radar a une ouverture de 0,18°, ce qui donne une couverture de 3 mètres à 1km ou 1,5 mètres à 500 mètres (voir figure 42).

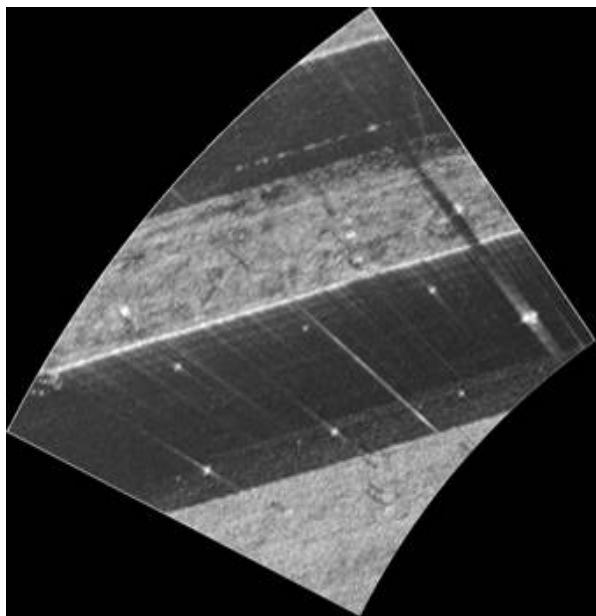


Figure 41 : Image radar de piste (source QinetiQ)

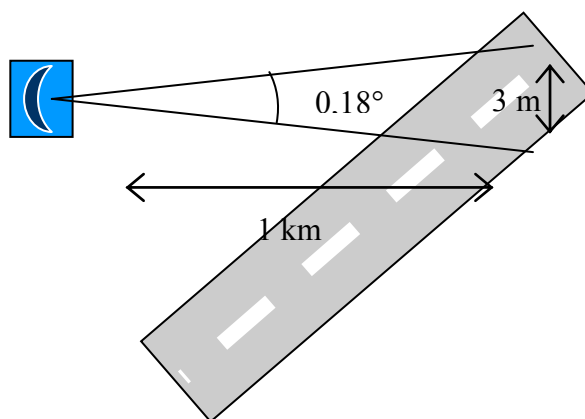


Figure 42 : La résolution angulaire du faisceau radar est 0,18° (source QinetiQ)

Confirmation par l'image

Au début de l'année 2007, la société a développé un système optionnel de caméras servant à confirmer la présence d'un objet par un aperçu vidéo. Ce système additionnel est désormais proposé lors de la commercialisation du système.

L'idée de « confirmation par l'image » est de fournir une preuve de la présence d'un objet étranger sur la piste en pointant automatiquement une caméra sur l'objet étranger détecté par un radar.

L'architecture de l'installation n'est pas modifiée. A chaque unité de détection radar est associée un dispositif caméra permettant une vision de jour, de nuit (couplé avec un illuminateur infrarouge à 830 nanomètres) et une vue d'ensemble de la zone concernée.

Lors de la détection d'un objet par l'unité radar, l'utilisateur a ainsi la possibilité d'obtenir une image vidéo de l'objet incriminé, en sélectionnant l'alarme affichée sur l'interface graphique.

Les deux figures suivantes donnent un aperçu du dispositif caméra (figure 43) et de son installation (figure 44).

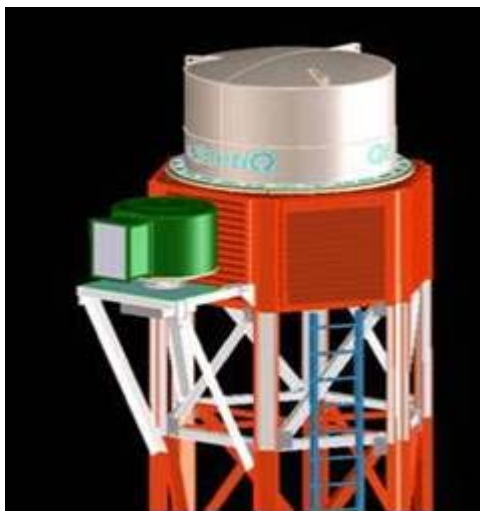


Figure 43 : Radar et caméra associée (source QinetiQ)



Figure 44 : Confirmation par caméra (source QinetiQ)

Chaque section de piste est alors couverte à la fois par un radar et une caméra.

Les figures suivantes montrent le pointage de la caméra sur un objet (figure 45) et l'aperçu fourni par le dispositif (figure 46).

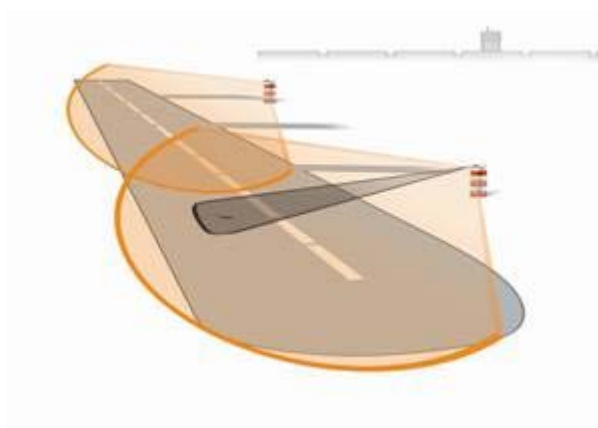


Figure 45 : Zone de détection couverte par un radar et une caméra (source QinetiQ)



Figure 46 : Objets situés à 1 km du radar (source QinetiQ)

7.1.1.5 - Performances

QinetiQ annonce une capacité de détection d'objets en fonction d'une valeur minimale de SER correspondant à -20dBm^2 en temps sec pour une sphère, et 0dBm^2 en cas de précipitations d'une valeur de 16mm/h .

Un graphique théorique a été fourni par la société QinetiQ.

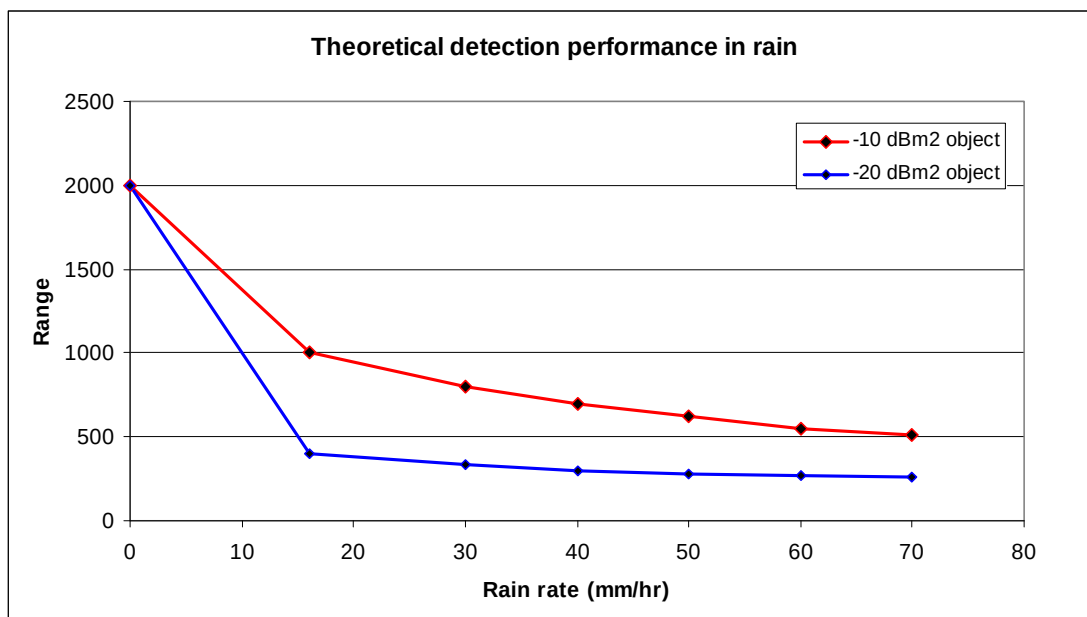


Figure 47 : évolution des performances de détection en fonction de la SER et de l'intensité de pluie [40]

Une SER de -10dB correspond à la taille d'une canette de soda.

Le seuil de détection peut être abaissé à la demande de l'utilisateur, avec cependant une augmentation du taux de fausses alarmes.

Le système est également en mesure de détecter les objets quelle que soit leur matière constitutive. Il est également en mesure de différencier les objets « légitimes » (balises, aéronef, véhicule, etc.) des objets étrangers.

Le système assure une détection permanente de la piste et de ses accotements, quelles que soient les conditions météorologiques et de visibilité (brouillage, nuit, etc.).

7.1.1.6 - Expériences

Le système a été implanté sur l'aéroport de Vancouver (Canada) en 2006, Dubaï (Emirats Arabes Unis), Doha (Qatar) Londres Heathrow et la base militaire de Boscombe Down (Royaume-Uni).

Par ailleurs, des démonstrations ont été effectuées sur plusieurs aéroports, dont l'aéroport de Paris Charles de Gaulle (France).

Enfin, le système est en cours de test par la FAA. Les résultats de ces tests n'ont pas encore été rendus publics.

7.1.2 - Analyse du système

Préambule : L'analyse, présentée ici, repose sur la documentation fournie entre l'année 2006 et l'année 2008, par la société QinetiQ. Il peut être envisagé que des modifications et améliorations techniques aient été apportées au système après cette période. Ainsi, les éléments d'analyse de cette section ne tiennent pas compte de ces nouvelles adaptations.

7.1.2.1 - Eléments sur les choix techniques

↳ Le détecteur radar

Le radar est de type FMCW avec modulation en dents de scie, il fonctionne en gamme millimétrique. Le choix d'une fréquence centrale de 94,5 GHz est approprié compte tenu des propriétés de la propagation des ondes à cette fréquence.

Par ailleurs, le choix d'une onde millimétrique permet d'obtenir une sensibilité permettant la détection d'objet de petite taille. En effet, théoriquement, pour une longueur d'onde donnée (λ), la limite de résolution est égale à la demi-longueur d'onde ($\lambda/2$). Le radar fonctionne avec une onde d'une longueur d'onde approximativement de 3 mm. Dans la réalité, le seuil de détection est un peu plus élevé et dépend de la surface équivalente radar (SER) de l'objet ainsi que du filtre permettant d'éliminer le bruit de fond.

Par ailleurs, la forme retenue pour l'antenne permet la production d'un faisceau radar avec un spot elliptique peu divergent, qui permet un plus grand flux par unité de surface et couvrant la largeur de piste.

Enfin, le radar utilise une onde de polarisation circulaire avec un filtre bidirectionnel pour l'onde retour, ce qui permet de réduire les influences de la pluie, ainsi que du sol.

Par contre, le choix d'une détection uniquement par radar introduit un risque de non détection. En effet, en fonction de la position et de la forme de l'objet, il est possible que la SER soit insuffisante pour assurer une détection. Ainsi, certains objets d'une taille supérieure au seuil de détection annoncé par le fabricant peuvent ne pas être vus par le système.

↳ La caméra de confirmation (optionnelle)

L'emplacement des caméras permet de minimiser les structures à construire, celle-ci étant implantée directement sur la tour où le radar est implanté. Par ailleurs, afin de minimiser les vibrations dues au vent, le fabricant a choisi de l'installer dans un radome favorisant les écoulements d'air et permettant de protéger l'ensemble des intempéries.

En raison du développement récent de ce système optionnel, il est toutefois difficile de s'assurer de la bonne intégration et de l'efficacité réelle du système, notamment pour ce qui concerne la visibilité de nuit. Il introduit par ailleurs des risques de dysfonctionnement supplémentaire qu'il conviendra de gérer.

↳ Le système

Compte tenu de la technologie utilisée, la réparation des émetteurs-récepteurs pourrait être supposée élevée, toutefois l'expérience acquise à travers les différentes installations tend à montrer que le système est plutôt robuste avec aucune défaillance à noter. Ce point n'est toutefois pas à négliger.

Même si lors des contacts avec le fabricant, il n'a pu être identifié de délai moyen avant panne, la durée de vie d'un tel système peut être estimée à 10 années (en condition d'utilisation standard et conforme aux prescriptions du fabricant).

Le choix d'un unique récepteur par radar joue sur la performance du système. En effet, la SER varie en fonction de l'angle fait entre l'objet et le faisceau radar incident et en fonction de la direction d'observation. Il est ainsi possible que sous certains angles un objet ne puisse pas être vu. L'augmentation du nombre de récepteurs permettrait une vision stéréoscopique, améliorant de fait la probabilité de détection (moyennant cependant un surcoût et une complexification du traitement des alarmes).

↳ Interface homme – machine

L'interface du système semble adaptée aux besoins des utilisateurs avec une lisibilité satisfaisante.

↳ **Multiplicité des radars**

Ainsi qu'il a été souligné précédemment, pour les pistes de plus de deux kilomètres, au moins deux unités radar sont à implanter, avec une zone de recouvrement possible des différents radars. Dans sa dernière version de logiciel, les images radar provenant des différents détecteurs sont croisées afin d'éviter le déclenchement de deux alarmes pour un unique objet.

7.1.2.2 - Réponse aux exigences

↳ **Réponse aux exigences fonctionnelles**

⇒ **Fonction de détection et d'alerte automatique**

Le système assure une détection continue des objets étrangers et sans perturbation directe du trafic. L'opérateur est automatiquement informé, de manière visuelle et sonore, de la détection d'un objet par le système.

⇒ **Fonction de localisation**

Le système assure une localisation des objets détectés à 3 mètres près. Une telle précision permet une collecte aisée, compte tenu de la précision des appareils GPS commerciaux (dont la précision peut atteindre les 3 mètres).

⇒ **Fonction de confirmation**

Le système permet en option d'obtenir une confirmation visuelle de l'objet, cependant cette fonction automatique qui permet la mise au point et l'agrandissement de l'objet n'assure pas la reconnaissance des objets ; pour QinetiQ, cette action relève de l'analyse humaine. L'avantage de cette méthode est de fournir à l'opérateur des éléments visuels permettant une identification de l'objet.

Dans le cas du système Tarsier, cette fonction, optionnelle, de confirmation apparaît être une nécessité pour contenir le nombre de fausses alarmes à un taux raisonnable.

⇒ **Fonction d'identification**

Dans le cas où le système Tarsier n'est pas doté du système optionnel de caméras, l'opérateur ne dispose d'aucune information relative à l'objet.

Lorsqu'il est doté du système de caméras, le système Tarsier ne prévoit pas de classification des objets détectés, ce rôle étant dévolue à l'opérateur qui devra analyser l'image qui lui sera fournie par le système ; dans le cas où la résolution de la caméra ne permet pas une identification sûre de l'objet, l'expérience de l'opérateur devient essentielle et à défaut de certitude, le principe de précaution sera sans doute appliqué.

↳ **Réponse aux exigences opérationnelles**

⇒ **Période de détection**

Le système assure une détection permanente (hors période de maintenance et pannes).

⇒ **Compatibilité aéroportuaire**

Ce point est traité dans le titre 5.1.2.3

⇒ **Conditions de fonctionnement**

Le système est conçu pour fonctionner de jour comme de nuit, dans toutes les conditions météorologiques. Néanmoins, des réductions de performances sont possibles (voir paragraphe suivant sur les exigences de performances).

↳ **Réponse aux exigences de performances**

⇒ **Caractéristiques des objets étrangers détectés**

A une distance de 1 km d'un détecteur, le fabricant assure la détection d'un objet étalon métallique cylindre de 3 cm de diamètre et 3,7 cm de hauteur. Ce seuil apparaît un peu élevé par rapport à la valeur recommandée, mais reste acceptable en l'état actuel des connaissances, s'agissant du seuil de détection en limite de zone de couverture du radar (une meilleure performance est attendue dans les zones plus proches).

Il est délicat de se prononcer sur la réalité effective de cette annonce, des tests étant nécessaires pour le confirmer. En effet, les radars détectent des surfaces équivalentes radar qui ne sont pas toujours corrélées avec la taille réelle des objets, mais qui dépendent de nombreux autres paramètres comme le matériau, la forme de l'objet et les angles (objet, antenne réceptrice) et (objet, antenne émettrice).

Par ailleurs, ce seuil diminue par temps de pluie. En effet, la documentation du fabricant indique [40] une diminution de la performance de détection par pluie importante (voir §7.1.1.5). A noter cependant que dans la région parisienne, la hauteur de précipitation n'a pas dépassé 50 mm/jour entre novembre 2006 et octobre 2007 et que dans la plupart des cas, cette hauteur reste inférieure à 20 mm/jour.

La documentation [40] fournie par le fabricant donne une courbe théorique d'atténuation du signal en fonction de l'intensité de la pluie. Des mesures sur site apparaissent nécessaires pour confirmer ce graphe théorique.

De part la nature de la méthode radar de détection, certaines matières et certaines formes sont susceptibles d'être moins bien détectées que d'autres, et de jouer sur le seuil de détection. Ici aussi, des tests restent nécessaires pour confirmer les seuils de détection en fonction du matériau de l'objet, de sa forme et de sa position par rapport au radar.

Enfin, on peut noter que pour les objets immergés dans des flaques d'eau seule la partie émergée renvoie un écho radar.

⇒ **Caractéristiques des animaux détectés**

Si le système n'a pas été conçu dans l'objectif de détecter les animaux, il permet la détection d'objets immobiles dans la mesure où il fait plusieurs passages afin de confirmer la présence d'un objet. Dès lors, seuls les animaux immobiles pendant un temps suffisant sont susceptibles d'être détectés.

Par ailleurs, le système n'effectuant pas de surveillance continue des objets détectés, il lui est difficile de corréler les positions d'un animal en déplacement et l'identifier comme un objet unique.

En revanche, le système de caméra peut permettre d'obtenir des photos des animaux lorsque ceux-ci sont détectés. L'opérateur peut également prendre la main sur une caméra et scanner manuellement la piste à sa guise.

↳ **Réponse sur la zone de détection**

Le système assure une détection efficace sur les surfaces revêtues de la chaussée, c'est à dire la piste, et les accotements s'ils sont revêtus.

Par contre, le système n'est pas en mesure de détecter des objets qui seraient noyés dans la végétation. Ainsi, une détection dans la bande de piste n'apparaît pas pertinente avec ce système.

↳ Réponse sur le temps de détection

La documentation du fabricant indique que le système effectue des balayages de contrôle avant de confirmer la présence d'un objet, ainsi qu'une comparaison avec des « images » radar de référence. Ainsi, si le cycle de balayage de l'antenne radar est de 72 secondes, le temps de détection est en fait de 3 à 5 minutes (voir référence [27], p6) pour un balayage de 180 degrés.

Un temps de détection plus long semble possible dans les faits.

7.1.2.3 - Eléments sur la compatibilité aéroportuaire

↳ Compatibilité avec les contraintes d'implantation

Les détecteurs du système TARSIER sont implantés latéralement à la piste, aussi, les contraintes dans l'axe de la piste ne sont pas applicables (voir la coupe transversale fournie dans la section 5.1.11 du présent rapport).

Ainsi que mentionné précédemment, les détecteurs ont une portée d'environ un kilomètre. Aussi, les libertés de positionnement à une distance au-delà de 150 mètres de l'axe de piste sont assez nombreuses.

Par ailleurs, le système ayant une hauteur minimale de 6 mètres, le respect des surfaces de dégagement imposent que le système soit implanté à une distance minimale d'environ 190 mètres de l'axe de piste (pour une piste de chiffre de code 3 ou 4). Ce qui signifie que pour les pistes de lettre de code E dotées d'une voie de circulation parallèle de même lettre de code, la distance (piste, voie de circulation) doit être d'au moins de 250 mètres de l'axe de la piste pour que le détecteur puisse être implanté en respectant tant les dégagements de la piste que celles de la voie de circulation.

En conclusion, bien que la faisabilité d'implantation du système dépende pour une large part de la configuration topographique (fonction de l'altitude du point d'implantation du composant concerné par rapport à l'altitude de la piste), le système TARSIER ne devrait pas poser de problème majeur d'installation. A noter par ailleurs que le nombre réduit de détecteurs permet une plus grande souplesse pour le choix de l'implantation par rapport aux entrées/sorties de piste.

Enfin, une attention est à apporter par les exploitants choisissant de se doter d'un tel système pour ce qui concerne la disponibilité et la configuration du réseau câblé utilisé par le système pour la communication entre les différents éléments dont il est constitué.

↳ Compatibilité avec les équipements aéronautiques

Le système est basé sur des émetteurs et des détecteurs électromagnétiques fonctionnant dans les gammes millimétriques. En conséquence, le système n'a pas d'impact sur le fonctionnement des aides visuelles et ne perturbe pas la signalisation visuelle de la piste (pas d'émission de lumière susceptible d'être confondue avec une aide lumineuse).

Concernant l'équipement optionnel du système permettant la confirmation vidéo des objets détectés par le radar, l'impact sur l'équipement ne semble pas présenter non plus d'incompatibilité. En effet, la caméra vidéo ne nécessite pas l'implantation d'un illuminateur fonctionnant dans le domaine du visible, et de ce fait, il n'y a pas de risque de perturber les équipements visuels de l'aérodrome. De son côté, la caméra infrarouge, fonctionnant lorsque la visibilité devient insuffisante, utilise un illuminateur infrarouge qui n'émet pas dans le domaine visible et de ce fait, cet équipement n'a pas d'impact sur les équipements visuels de l'aérodrome.

Le système fonctionne dans des longueurs d'onde et avec une puissance émise qui ne semblent pas avoir d'impact sur les aides radioélectriques.

Concernant les équipements optionnels (caméras vidéo, caméra infrarouge et illuminateur infrarouge) ceux ci n'ont pas d'impact sur les équipements radioélectriques de l'aérodrome.

Enfin, le système n'est pas perturbé par les équipements radioélectriques et visuels de l'aérodrome. En effet, les longueurs d'onde et la puissance des équipements radioélectriques n'affectent pas le signal émis par le

radar. De la même manière, afin d'éviter les effets d'éblouissement par certaines aides visuelles de piste qui sont omnidirectionnelles, QinetiQ a équipé ses caméras de confirmation d'un filtre. L'expérience semble montrer que cette solution est tout à fait acceptable.

En conclusion, le système ne présente pas d'incompatibilité, à ce stade de l'étude, avec le fonctionnement des équipements de l'aérodrome.

↳ **Compatibilité avec l'exploitation de l'aérodrome**

La société QinetiQ a fourni une documentation riche sur l'exploitation du système.

⇒ **Impact sur les personnes et les aéronefs**

Concernant l'impact du système sur les pilotes, les passagers et les agents susceptibles de se trouver sur la piste, la puissance des ondes émises par le système est 100 mW, le système n'a pas d'impact sur les personnes.

⇒ **Impact sur la capacité**

Le système TARSIER propose une détection permanente des objets sur la piste qui ne nécessite pas l'arrêt des opérations. Aussi, sur le plan de la détection d'objet, le système n'a pas d'impact sur la capacité de l'aérodrome.

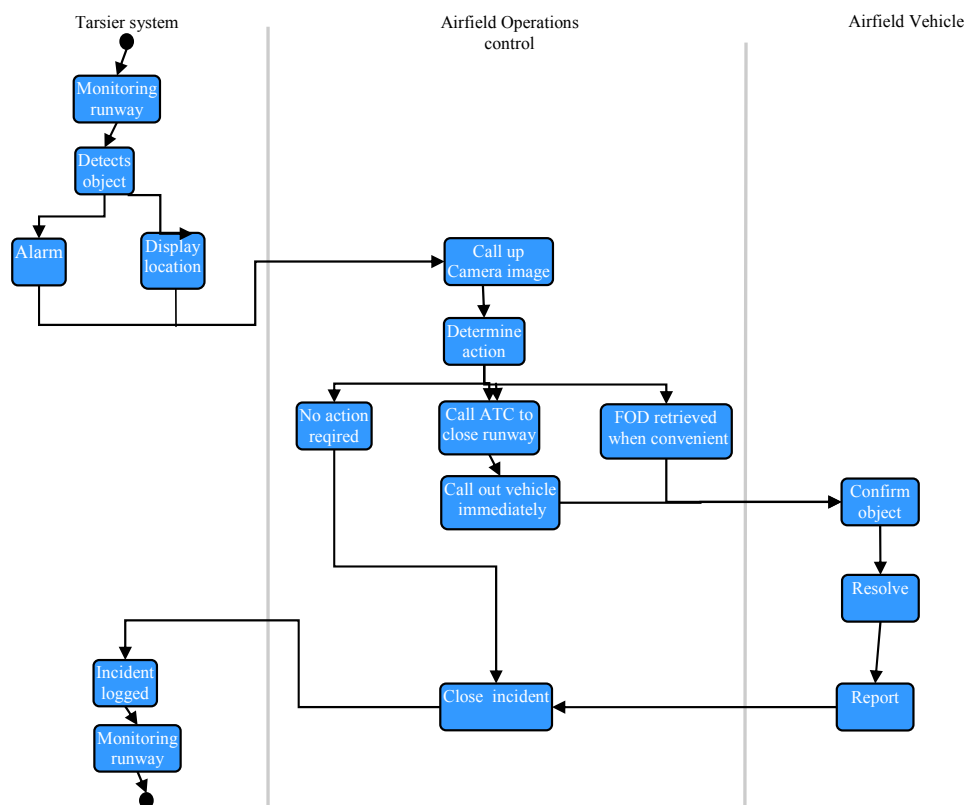
QinetiQ propose de doter les équipes chargées de l'enlèvement des objets sur les pistes d'appareils portables (types assistant personnels) permettant une localisation des objets par GPS, ce qui peut faciliter l'enlèvement de l'objet et accélérer la procédure.

D'un autre côté, sans la présence des caméras, le système peut présenter un taux de fausses alarmes élevé. Ce point est particulièrement pénalisant pour la capacité aéroportuaire dans la mesure où s'il n'y a pas de moyen de confirmation, l'alarme nécessite, par précaution, d'initialiser une procédure de collecte de l'objet détecté, ce qui peut conduire à des arrêts d'opérations de piste indus. De ce fait, il apparaît que le système Tarsier, sans le système de caméras, a un impact négatif sur la capacité de la piste.

Ainsi, il apparaît que le système additionnel de caméras ne doit pas être considéré comme une option pour ce système.

⇒ **Exploitation du système**

Concernant l'intégration du système dans les procédures d'exploitation, QinetiQ propose une procédure standard [27]. De manière synthétique, le schéma proposé est le suivant :



Ce schéma indique notamment que la décision d'enlèvement de l'objet relève de l'exploitant de l'aérodrome. Néanmoins, la décision d'arrêter des opérations sur la piste relève des services de la navigation aérienne, ce qui conditionne le moment de l'enlèvement de l'objet. Ainsi, afin de prendre sa décision sur le moment où le trafic peut ou doit être arrêté, les services de la navigation aérienne pourraient souhaiter disposer d'une information visuelle de l'objet incriminé afin de prendre la meilleure décision en fonction des opérations aériennes en cours (aéronef en courte finale, situation d'urgence, etc.).

Ce point mérite d'être détaillé et discuté, notamment avec les services de la navigation aérienne, pour savoir si un terminal est à implanter également dans la tour de contrôle et, dans ce cas, identifier quelles sont les informations souhaitées par le service en charge du contrôle aérien.

Enfin, QinetiQ ne propose pas de méthode de gestion des situations dégradées (panne d'un radar, panne d'alimentation électrique des détecteurs, dysfonctionnement d'un radar, dysfonctionnement d'une caméra, etc.). En particulier, le cas du dysfonctionnement de la caméra est à étudier avec soin, notamment dans le cas où son dysfonctionnement conduit à pointer ailleurs que sur la zone où le radar a détecté un objet, conduisant l'opérateur à annuler l'alarme alors qu'un objet est potentiellement présent sur la chaussée.

Des protocoles de fonctionnement du système en mode dégradé devraient être établis avant sa mise en service sur la piste.

7.1.3 Conclusions

Le système développé par QinetiQ apparaît répondre aux fonctions essentielles identifiées dans le chapitre 4 et ne pas poser de difficulté majeure d'implantation sur l'aérodrome.

Une attention particulière est à apporter cependant aux taux de fausses alarmes, même si le système de caméras devrait permettre de filtrer un certain nombre des fausses alarmes. A ce titre, le système de caméras

ne doit pas être optionnel. Sans le système additionnel de caméra, le système Tarsier ne répond pas totalement aux exigences essentielles (impact sur la capacité dû à des fausses alarmes) et à certaines fonctions utiles comme l'aperçu vidéo de l'objet concerné.

Le développement de protocoles de fonctionnement du système en mode dégradé est nécessaire avant utilisation du système.

La durée de vie du système est de l'ordre de la dizaine d'années (en fonction des conditions d'utilisation).

Bien que non conçu pour la lutte contre le péril animalier et que de par son fonctionnement, il ne peut assurer une détection des animaux présent sur ou à proximité de la piste, le système TARSIER apporte une assistance aux équipes en charge de ce service. En effet, avec l'installation des caméras, l'opérateur est en mesure de pointer sur un animal dont la présence a été rapportée (pilote ou autres) afin de s'assurer de la présence effective de l'animal et son identification (adaptation des moyens de lutte face à la menace). Par ailleurs, les animaux restant immobiles suffisamment longtemps déclencheront une alarme permettant leur détection.

La réalisation de tests sur site apparaît enfin nécessaire pour ce système afin de confirmer ses performances, notamment par temps de pluie ou de neige. Si la documentation fournie laisse planer un léger doute, notamment sur les performances de la caméra infrarouge pour l'identification d'objets de petite taille, au moins peut-elle permettre de confirmer la présence d'un tel objet.

7.2 Le système Stratech (iFerret)

7.2.1 - Description du système

Le système iFerret, développé par la société Stratech (Singapour), a été spécifiquement conçu pour la détection d'objet sur les chaussées aéronautiques.

7.2.1.1 - Principe de détection du système

La technique de détection du système iFerret fait référence au domaine optique du spectre électromagnétique. Dans ce domaine, la technique utilisée pour détecter des objets est l'analyse d'images vidéo. La détection est dite passive ; la source du rayonnement reçu par la caméra vidéo est la lumière naturelle réfléchie à la surface des objets.

7.2.1.2 - Les composants du système

↳ Le détecteur

Les détecteurs utilisés par le système sont électro-optiques (caméras) équipés d'objectifs à longue focale permettant de zoomer sur la piste. Les caméras sont équipées de capteurs mégapixels couleur assurant une haute résolution. Chaque caméra est située sur un pylône métallique dont la hauteur par rapport à l'axe de la piste varie entre 6 et 8 m, selon la topographie de l'aérodrome. Le pylône est conçu pour limiter les risques de vibration de la caméra (dus notamment au vent : il résiste à un vent de 120 km/h).

Les détecteurs sont implantés à une distance égale les uns des autres d'environ 350 mètres, et à une distance d'environ 250 mètres de l'axe de la piste. Le pylône et le détecteur sont ainsi placés sous les surfaces de dégagement de la piste.

Boîtier IP55 monté
sur le pylône de la
caméra



Figure 48 : Détecteur caméra sur pylône en treillis (source Stratech)

La documentation technique [34] fournit les spécifications suivantes :

No. of detection cameras	8 – 12
Camera placement	150 – 250 meters from runway centerline
Camera type	Color megapixel
	500 – 1000mm FL lens
Camera height	6 – 12 meters
Camera range	> 1 km
Detection resolution	4 cm object - up to 600 meters
Environmental	IP66
Humidity	95% non-condensing
Temperature	-20 to + 60 degrees C
Camera Interfaces	USB, RS232
Video processor interface	TCP/IP
Alert mode	Audio & visual

Figure 49 : Tableau relatif aux caractéristiques techniques du système (source Stratech)

↳ Les équipements connexes

Le détecteur est accompagné d'un bloc d'alimentation (IP 55) qui peut être implanté sur le pylône de la caméra ou à côté (voir figure 48).

Chaque caméra est reliée à une unité de traitement vidéo dédiée (video processing unit) par des fibres optiques ou par WiFi. Les unités de traitement vidéo assurent un traitement et une conversion du signal vidéo.

Ces unités de traitement vidéo sont reliées à un répartiteur (switch) qui assure la transmission par câble Ethernet de l'information aux différents composants d'exploitation du système.

↳ Les équipements d'exploitation

Les éléments de détection sont complétés par une unité de gestion du système (unité doublée pour assurer un secours en cas de panne) et un terminal utilisateur (ordinateur de bureau).

7.2.1.3 - Architecture du système

Le réseau de caméras constitue un réseau qui est relié au réseau local (LAN) composé des périphériques dédiés au système iFerret. Il s'agit du système d'analyse des données (unité de traitement d'images), des interfaces homme-machine et de l'unité de gestion des équipements (voir figure 50).

Le fabricant envisage d'utiliser le réseau de câble déjà existant sur l'aérodrome, en particulier pour ce qui concerne les câbles en fibres optiques pour relier les caméras et les unités de traitement vidéo.

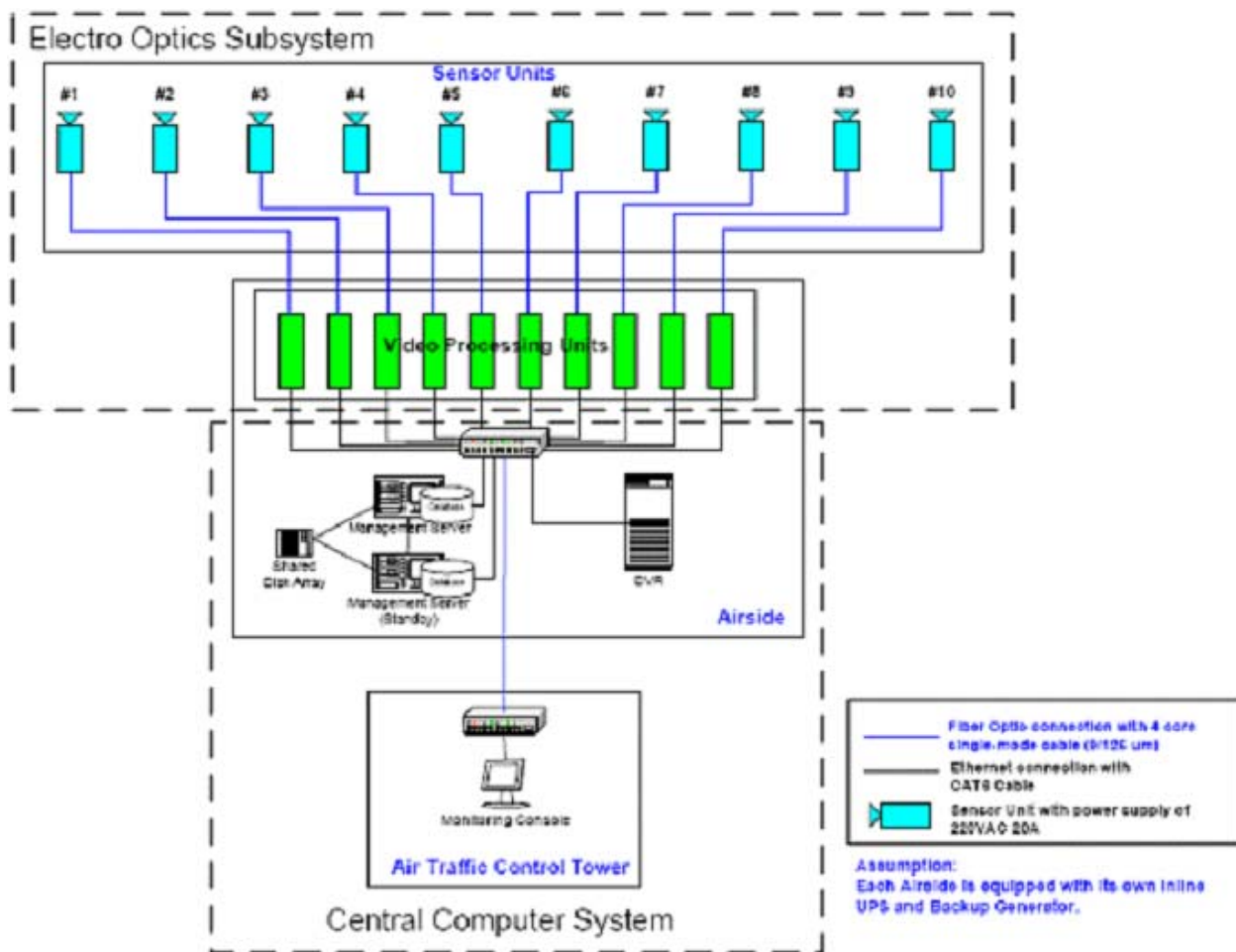


Figure 50 : Equipements composant le système iFerret (source Stratech)

7.2.1.4 - Fonctionnement du système

↳ Principe de fonctionnement

Pour une piste de longueur 3 000 m, le nombre de caméras installées est d'environ 8, qui peuvent être placées d'un côté unique ou réparties de part et d'autre de la piste en fonction des contraintes d'espace (notamment au cas où une voie de circulation empêche l'implantation d'un détecteur). Les caméras sont espacées d'environ 350 mètres.



Figure 51 : Disposition unilatérale des détecteurs (source Stratech)

Chaque caméra a un secteur de surveillance dédié (figure 51). Les secteurs sont définis par logiciel, ce dernier délimitant des zones de détection rectangulaires. La zone surveillée par un détecteur est attribuée à lui seul, c'est à dire qu'elle ne se superpose pas à celle des détecteurs adjacents (voir figure 52). Les détecteurs sont gérés individuellement par le système (c'est à dire que les informations transmises par un détecteur ne sont pas recoupées avec celles provenant des détecteurs adjacents).

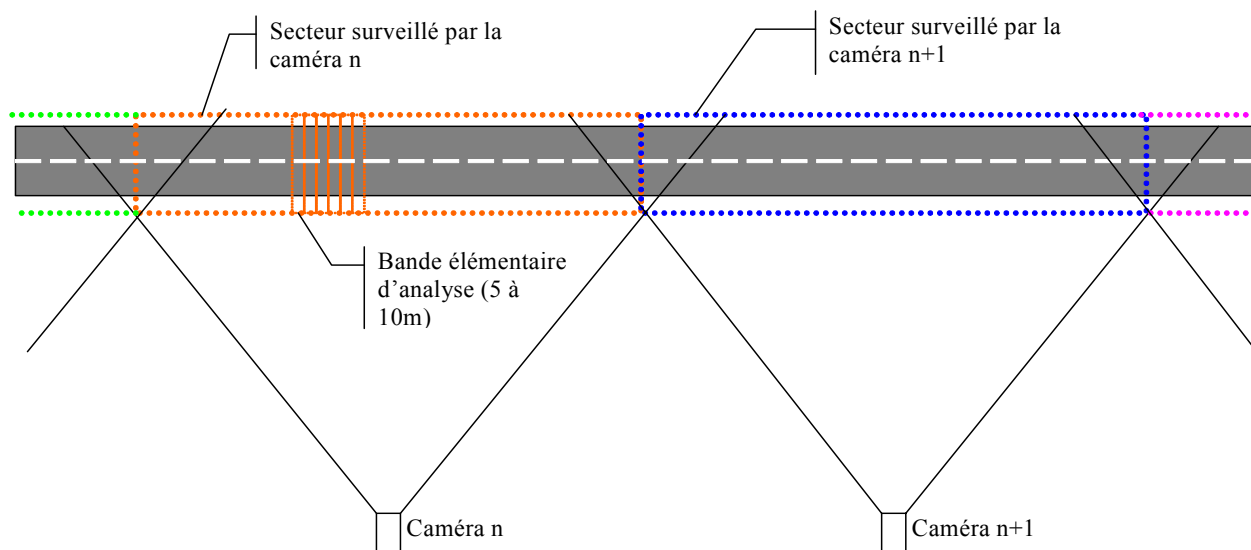


Figure 52 : Répartition des zones de surveillance par caméra

Une caméra effectue un mouvement de rotation autour de son axe de fixation pour une scrutation complète de son secteur. La durée du cycle de rotation en condition normale d'utilisation (c'est à dire sans dysfonctionnement d'une caméra et sans objet détecté) peut varier de 3 à 6 minutes aller-retour.

Chaque secteur dédié à une caméra est découpé en bandes d'une profondeur de la largeur de la piste et de largeur de 5 à 10 mètres. Ces bandes sont analysées au fur et à mesure par le système, ce qui prend 4 à 5 secondes (bande élémentaire représentée sur la figure 52).

Dans le cas où une caméra est mise hors service, les caméras adjacentes prennent le relais, automatiquement, et dans ce cas le cycle de rotation passe à 4 à 8 minutes.

Enfin, dans le cas où un objet est détecté, la caméra s'arrête sur l'objet (en fait la bande élémentaire concernée) pour procéder aux vérifications dont la durée dépend des conditions météorologiques, de visibilité, etc.

Le système peut transmettre par GPRS, SMS ou MMS les informations concernant un objet étranger détecté et confirmé, via un appareil portable (ordinateur de poche communiquant par exemple) aux agents chargés de son enlèvement, dans un but de réduire le temps d'intervention.

Le système assure une détection continue et permanente.

↳ **Système de traitement de l'image**

Le système de caméra est complété par un système de traitement d'images qui permet de détecter des objets qui ne seraient pas vus sur l'image produite directement par la caméra. La figure 53 montre les images avant et après traitement.

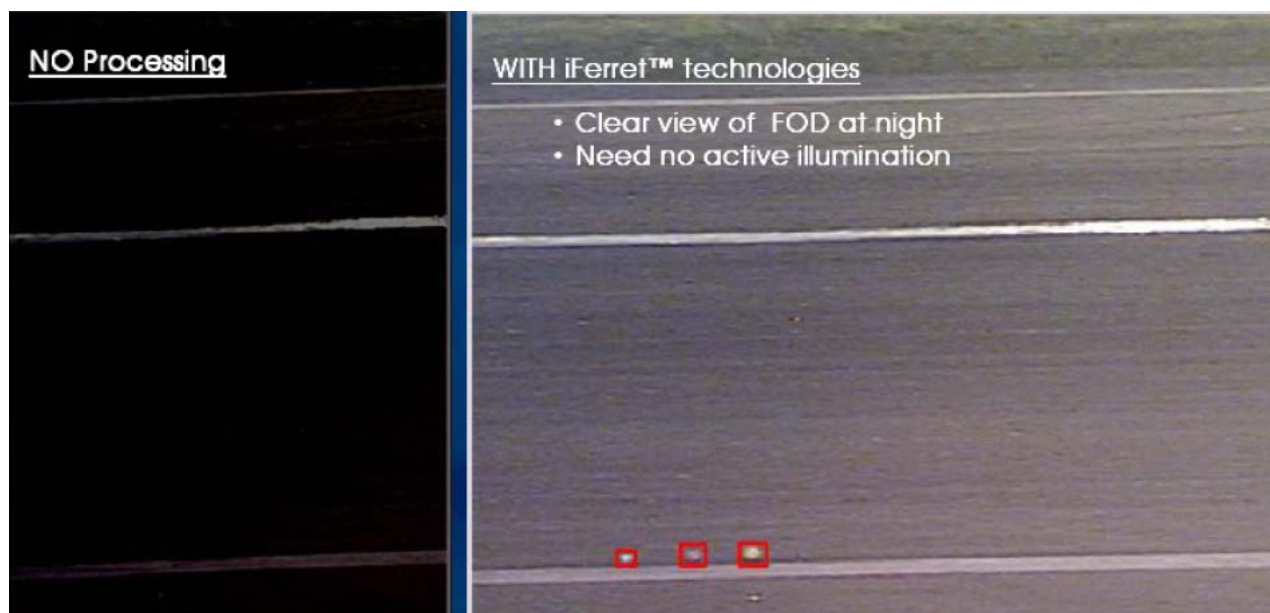


Figure 53 : Image avant et après traitement par le système iFerret (source Stratech)

Enfin, le système assure un enregistrement continu des données, ce qui permet un traitement a posteriori des événements, favorisant ainsi une exploitation des résultats de manière synthétique.

↳ **Les modes de fonctionnement**

⇒ **Fonctionnement en mode utilisateur**

Le système est doté d'une interface utilisateur unique permettant de disposer des informations suivantes :

- une vue globale de la caméra ;

- une vue des objets étrangers détectés et mise en évidence ;
- une carte de l'aérodrome avec localisation des objets détectés ;
- une fenêtre d'alerte ;
- une liste des objets détectés ;
- et une fenêtre de statut du système.

La figure 54 donne un aperçu de l'interface graphique.



Figure 54 : Interface graphique du système iFerret (source Stratech)

L'alarme déclenchée par le système est à la fois visuelle et sonore. Le système permet la localisation d'un objet au mètre près. L'opérateur confirme la présence d'un objet étranger et dans ce cas, le logiciel identifie l'objet et le marque ; dans le cas contraire, si l'opérateur indique qu'aucun objet n'est présent, l'alarme disparaît et l'objet détecté n'est plus mis en évidence. La caméra est débrayable par l'opérateur qui peut choisir d'interrompre le mode de détection pour visualiser une zone en particulier (avec une possibilité de zoom sur un objet détecté).

Le système détermine qualitativement la taille de l'objet : petit, moyen et gros, selon des paramètres prédéterminés. L'objectif de ce dispositif est de fournir à l'opérateur une indication sur le danger potentiel que représente l'objet étranger.

⇒ **Fonctionnement en mode maintenance**

Le système est doté d'un ordinateur dédié à la maintenance du système (gestion de son fonctionnement). Il permet notamment d'identifier les caméras en panne et de déclencher automatiquement une réaffectation des caméras adjacentes à celle hors service (voir paragraphe « Gestion des modes dégradés » ci-après).

↪ **Gestion des situations dégradées (figure 55)**

Le fabricant prévoit un mode dégradé en cas de panne d'une des caméras.

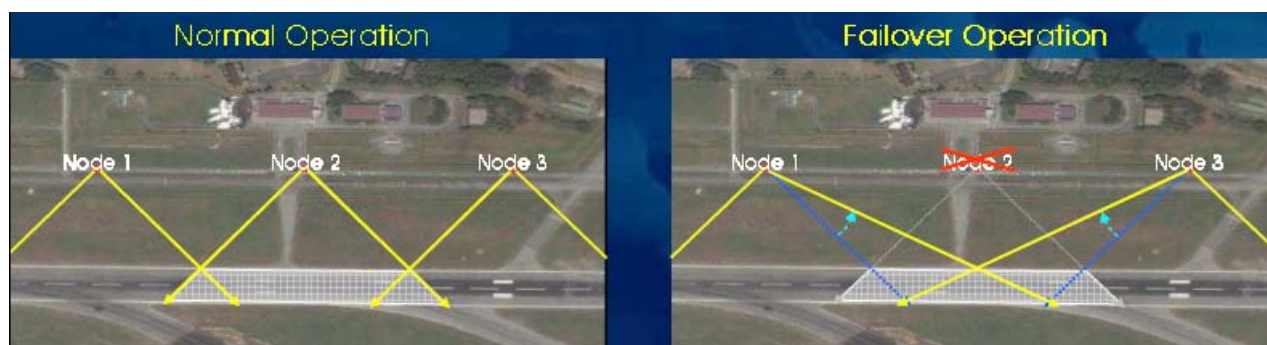


Figure 55 : Système de gestion des situations dégradées par le système iFerret (source Stratech)

Dans l'exemple, en cas de panne de la caméra 2, les caméras adjacentes augmentent automatiquement leur angle de rotation pour couvrir le secteur que couvrait l'élément en panne, permettant ainsi de couvrir à nouveau l'intégralité de la zone à surveiller.

7.2.1.5 - Performances

Le fabricant annonce une capacité de détection des objets d'une taille d'environ 4 cm (sphère) jusqu'à 440 mètres de distance [34] avec une précision de localisation de moins d'un mètre. La détection se fait en temps réel [34]. Néanmoins, le système peut détecter avec une probabilité plus faible des objets de plus petites dimensions.

Il fonctionne en permanence (7 jours sur 7 et 24 heures sur 24) quelles que soient les conditions météorologiques [31]. Néanmoins, le système est annoncé performant jusqu'à une intensité de pluie de 32 mm/h et avec une visibilité réduite à 350 mètres par temps de brouillard.

7.2.1.6 - Expériences

Ce système a été installé et évalué sur l'aéroport international de Changi à Singapour depuis 2006 dont deux pistes ont été équipées. Cette évaluation s'est transformée en un contrat commercial depuis février 2008.

Par ailleurs, le système est en cours de test par la FAA. Les résultats de ces tests n'ont pas encore été rendus publics.

7.2.2 - Analyse du système

Préambule : L'analyse, présentée ici, repose sur la documentation fournie entre l'année 2006 et l'année 2008, par la société Stratech. Il peut être envisagé que des modifications et améliorations techniques aient été apportées au système après cette période. Ainsi, les éléments d'analyse de cette section ne tiennent pas compte de ces nouvelles adaptations.

7.2.2.1 - Eléments sur les choix techniques

↳ Eléments sur la caméra

Le choix d'une caméra optique est intéressant dans la mesure où le système de détection permet également de fournir un aperçu de l'objet détecté, ce qui facilite d'autant son identification et son traitement.

En cas de nécessité, le système offre, en outre, la possibilité à l'opérateur de prendre la main sur la caméra afin d'effectuer un zoom manuel sur l'objet détecté. Cette possibilité permet de faciliter l'analyse de l'objet et son traitement. Cette possibilité rend inopérante la fonction de détection dans le secteur couvert par la caméra concernée, toutefois, pendant la durée de prise de contrôle de la caméra par l'opérateur, le système amènera

automatiquement les caméras adjacentes à balayer les zones couvertes par la caméra mobilisée (d'une manière identique à la gestion des situations dégradées).

↳ **Eléments sur le système**

Le système laisse la possibilité d'une communication entre les caméras et les unités de traitement vidéo par WiFi. Ce point nécessite une expertise de compatibilité supplémentaire afin de s'assurer qu'aucune perturbation des différents équipements aéroportuaires et aéronautiques ne soit à noter. Un mode de communication par fibre optique semble préférable à condition que l'aérodrome soit doté d'un tel réseau (sinon, l'installation du système nécessite un coût supplémentaire). En effet, le système nécessite l'existence d'un réseau de fibres optiques ou WiFi pour acheminer l'information vers les unités de traitement vidéo.

Le système ne comporte pas d'éléments complexes et sa maintenance n'est pas particulièrement lourde. Selon le fabricant la maintenance peut être assurée localement sans la nécessité d'une qualification lourde des agents de maintenance pour une durée de vie estimée à 10 années.

Chaque détecteur ayant un secteur dédié ne recouvrant pas celui des détecteurs adjacents, la détection se fait par un unique détecteur. Un recouvrement permettrait une vision stéréoscopique de l'objet augmentant de fait la performance de détection. Néanmoins, cela imposerait une modification du logiciel de traitement.

↳ **Modes d'utilisation**

L'interface utilisateur semble intuitive et claire. Elle permet notamment la visualisation des objets détectés par le système et permet à l'opérateur de confirmer ou non la présence d'un objet. L'apparition consécutive de deux boîtes de dialogue où l'opérateur doit entrer un message de confirmation permet de limiter les annulations accidentelles d'alarme.

Le fabricant a assuré que l'aperçu visuel fourni par le système est l'image issue de la caméra, sans traitement particulier. Ce point est important. En effet, si l'image délivrée à l'opérateur est une image traitée, une fausse alarme issue du traitement de l'image ne sera pas interceptée par l'opérateur.

↳ **Enregistrements par le système**

Le système assure un enregistrement des vidéos et des actions menées par les opérateurs [43]. La première fonction de sauvegarde permet une analyse de la provenance des objets étrangers en facilitant l'identification de la source de l'objet. Cette possibilité est intéressante, car elle permet avec l'analyse d'agir sur la source même de l'objet étranger, et donc d'être exploitée dans un but de réduction préventive de la probabilité de présence d'objets étrangers sur les pistes d'aérodrome.

↳ **Mode dégradé**

Le fabricant a prévu un fonctionnement en mode dégradé au cas où une caméra serait hors service. Le passage en mode dégradé est automatique et l'opérateur est informé, via sa console, de cette situation. Cette gestion des pannes est particulièrement intéressante puisqu'elle permet au système d'assurer sa fonction sur toute la longueur de la piste.

7.2.2.2 - Réponse aux exigences

↳ **Réponse aux exigences fonctionnelles**

⇒ **Fonction de détection et d'alerte automatique**

Le système assure une détection des objets étrangers continue et sans perturbation directe du trafic. L'opérateur est automatiquement informé, de manière visuelle et sonore, de la détection d'un objet par le système.

⇒ **Fonction de localisation**

Le système permet une localisation précise à 1 mètre près, ce qui est sans doute un peu plus que nécessaire dans des conditions de bonne visibilité. Cette précision peut éventuellement se révéler nécessaire dans des conditions moins favorables (de nuit par exemple) sous la condition que les agents soient capables de se repérer au mètre près. Il permet une gestion efficace de l'enlèvement de l'objet incriminé, avec notamment une information de localisation directement délivrée auprès des agents chargés de la collecte de l'objet détecté. Ceci permet de limiter l'impact sur la capacité lors de l'intervention de l'équipe chargée de procéder à l'enlèvement.

⇒ **Fonction de confirmation**

Bien que le système ne soit pas doté d'une fonction indépendante de confirmation de la présence d'un objet sur la piste, le système donne à l'opérateur un aperçu de l'objet étranger avec un agrandissement automatique de l'objet, ce qui entre dans le cadre de la définition d'une fonction de confirmation définie au 4.5.1.4.

Par ailleurs, cette information visuelle peut être complétée, ultérieurement, par une seconde visualisation de l'objet. Le système offre en effet la possibilité à l'opérateur, s'il n'est pas satisfait de l'agrandissement automatique proposé par le système, de prendre la main sur une caméra pour cibler sur l'objet détecté, ce qui permet d'avoir un second aperçu. Cette possibilité permet de lever un certain nombre de fausses alarmes, notamment dans le cas où l'objet détecté serait un animal resté suffisamment longtemps immobile pour être considéré comme un objet étranger. Néanmoins, cette possibilité a le désavantage de suspendre la fonction de détection de la caméra concernée le temps de l'intervention manuelle de l'opérateur, toutefois reprise par les caméras adjacentes durant la durée de l'opération.

Si l'image délivrée à l'opérateur est effectivement l'image issue de la caméra, sans traitement, il n'apparaît pas essentiel de doter ce système d'une fonction additionnelle de confirmation. Dans la négative, cette fonction additionnelle de confirmation apparaît nécessaire dans le but de limiter les fausses alarmes que le système pourrait déclencher. En effet, si la fausse alarme provient du traitement de l'image par le système, l'image fournie à l'opérateur contiendra l'information erronée et il ne lui sera pas possible d'identifier la fausse alarme.

⇒ **Fonction d'identification**

Le système n'offre pas à proprement parler de fonction d'identification telle qu'elle a été définie dans la partie 4.5.1.5.

Toutefois, le système est en mesure de caractériser la taille d'un objet de manière qualitative : petit, moyen, gros. Un paramétrage des seuils est possible. L'opérateur dispose ainsi d'une première information sur l'objet, ce qui lui permet d'avoir un élément d'analyse pour déterminer le moment le plus opportun pour déclencher la procédure de collecte de l'objet incriminé.

L'aperçu visuel affiché par le système à l'opérateur fournit à ce dernier un renseignement facilitant l'identification de l'objet détecté. On peut, cependant, relever que l'information visuelle fournie par le système peut présenter des difficultés d'interprétation de la part de l'opérateur qui pourra dans certains cas avoir du mal à identifier clairement l'objet incriminé (voir figure 56). Dans ce cas de figure, l'opérateur pourra classer l'objet sous l'appellation générique « FOD ».



Figure 56 : Aperçu des objets détectés (source Stratech [32])

↳ Réponse aux exigences opérationnelles

⇒ Période de détection

Le système assure une détection permanente (hors période de maintenance et pannes).

⇒ Compatibilité aéroportuaire

Ce point est traité dans le titre 7.2.2.3.

⇒ Conditions de fonctionnement

Le système est conçu pour fonctionner de jour comme de nuit, dans toutes les conditions météorologiques. Néanmoins, des réductions de performances sont possibles (voir paragraphe suivant sur les exigences de performances).

↳ Réponse aux exigences de performances

⇒ Caractéristiques des objets étrangers détectés

Le fabricant annonce un seuil de détection d'objet fiable à partir d'une taille de quatre centimètres, avec une possibilité de détection d'objet d'une taille plus petite. Ce seuil apparaît un peu élevé par rapport à la valeur recommandée dans la présente étude puisqu'un nombre élevé d'objets pourrait ne pas être détecté. Néanmoins, le constructeur offre la garantie d'une détection systématique pour les objets de quatre centimètres, ce que n'offrent pas, par exemple, des systèmes basés sur une technologie radar, la capacité de détection de ces derniers étant basée non pas sur la taille de l'objet, mais sur la surface équivalente radar. Enfin, comme d'autres constructeurs, le système offre la possibilité de modifier le seuil de détection, toutefois, cela n'est pas sans conséquences sur la probabilité de détection ou le taux de fausses alarmes.

S'agissant d'un système optique, une dégradation des performances peut-être possible par mauvais temps et en condition de visibilité réduite (par temps de brouillard notamment).

En revanche, Stratech annonce une performance équivalente, de jour, comme de nuit. Les vidéos de démonstration ([44] et [45]) tendent ainsi à montrer comme limitées les variations de performance durant une exploitation nocturne.

Le système reste cependant sensible aux conditions de visibilité, notamment dans la mesure où ses performances décroissent à partir d'une visibilité inférieure à 350 mètres pour devenir inopérantes en dessous de 155 mètres. Ces limites réservent le système aux pistes exploitées en dehors des conditions d'approches de précision de catégorie II/III, voire à quelques pistes homologuées pour les approches de précisions de catégorie I et pour les décollages par faible visibilité ([47]).

Enfin, le système étant annoncé performant jusqu'à une intensité de pluie de 32 mm/h, les problèmes de réduction des performances due à une telle intensité de pluie sous nos latitudes semblent présenter un risque faible (ainsi qu'il a déjà été mentionné, sur la région parisienne, une telle hauteur de précipitation correspond à une pluie exceptionnelle).

⇒ **Caractéristiques des animaux détectés**

Le système n'a pas été conçu dans l'objectif de la détection des animaux.

Le système effectue une détection par balayage de la piste. Il effectue également une différence entre les objets dits « légitimes » (avion, véhicule, personne, etc.) et les autres. Les objets en mouvement (dont les animaux) sont éliminés par une fonction du logiciel de gestion du système et ne font pas l'objet d'une alarme. Toutefois, le fabricant travaille sur une version qui sera capable de détecter les animaux (considérés comme des objets en mouvement).

Le système n'est donc pas utilisable actuellement dans le cadre de la lutte contre le péril animalier, n'étant pas à l'origine conçu à cette fin. Stratech annonce toutefois vouloir tenir compte de cette problématique dans une future version de son système.

⇒ **Réponse sur la zone de détection**

Le système assure une détection efficace sur les surfaces revêtues de la chaussée, c'est à dire la piste, et les accotements s'ils sont revêtus.

Par contre, le système n'est pas en mesure de détecter des objets qui seraient noyés dans la végétation. Ainsi, une détection dans la bande de piste n'apparaît pas pertinente avec ce système.

⇒ **Réponse sur le temps de détection**

Le système est annoncé avec un temps de détection assez court, compris entre quelques secondes et 4 minutes dans les cas les plus défavorables. Ce délai permet la détection d'un objet étranger entre deux mouvements d'aéronefs (cas le plus favorable) et entre trois à quatre mouvements d'aéronefs (cas le plus défavorable).

7.2.2.3 - *Eléments sur la compatibilité aéroportuaire*

⇒ **Compatibilité avec les contraintes d'implantation**

Les détecteurs du système iFerret sont implantés latéralement à la piste, aussi, les contraintes dans l'axe de la piste ne sont pas applicables (voir la coupe transversale fournie dans le chapitre 5.1.11 du présent rapport).

Les détecteurs du système iFerret sont implantés environ tous les 350 mètres aussi, des difficultés sont à craindre avec les pistes dotées d'un nombre important d'entrées/sorties de piste. Néanmoins, la possibilité d'implanter les caméras de part et d'autre de la piste permet de limiter les contraintes, avec une réserve toutefois pour les doublets de piste. Une analyse au cas par cas apparaît nécessaire.

Par ailleurs, les caméras sont installées sur des pylônes métalliques d'une hauteur comprise entre 6 et 8 mètres par rapport à celle de l'axe de la piste. Ainsi, le respect des surfaces de dégagement implique d'installer les détecteurs à une distance de 190 à 200 mètres de l'axe de la piste (pour une piste de chiffre de code 3 ou 4). Ce qui signifie que pour les pistes dotées d'une voie de circulation parallèle, cette dernière doit être placée à au moins 240 mètres (ou 250 mètres selon la hauteur de l'installation) pour que les caméras puissent être implantées (toujours pour une piste de chiffre de code 3 ou 4).

En conclusion, indépendamment des contraintes liées à l'implantation des caméras sur un aérodrome particulier (topographie du terrain), les caméras peuvent être implantées, cependant des difficultés sont à craindre pour les doublets de pistes dotées de nombreuses entrées/sorties de piste. Selon le fabricant, il pourra également être envisagé d'installer les caméras à une distance plus élevée de la piste.

↳ **Compatibilité avec les équipements aéronautiques**

Les caméras fonctionnent sans illuminateur, aussi, aucune onde électromagnétique ou lumineuse n'est émise par le système et le système ne présente aucune incompatibilité avec les équipements visuels et radioélectriques de l'aérodrome.

↳ **Compatibilité avec l'exploitation de l'aérodrome**

⇒ **Impact sur les personnes et les aéronefs**

L'ensemble de détection est un système passif. Ainsi aucun signal n'est émis par le système ; le système iFerret n'a pas d'impact sur la santé des personnes ou sur les aéronefs.

⇒ **Impact sur la capacité**

Le système iFerret propose une détection permanente des objets sur la piste qui ne nécessite pas l'arrêt des opérations. Aussi, sur le plan de la détection d'objet, le système n'a pas d'impact sur la capacité de l'aérodrome.

Lors des entretiens, le fabricant a indiqué une probabilité de fausses alarmes de 8%, ce qui représente un nombre réduit d'interventions en une année (sur Paris Charles de Gaulle, environ 250 objets étrangers sont collectés annuellement, ce qui correspond à une vingtaine d'interventions indues pour cause de fausse alarme). Ce chiffre devrait être confirmé par des tests.

La société Stratech prévoit l'utilisation d'assistants personnels [31] où les objets sont repérés, ce qui permet de faciliter la procédure d'enlèvement et d'accélérer l'enlèvement de l'objet sur la piste.

⇒ **Exploitation du système**

Le fabricant n'a pas fourni d'informations relatives aux procédures d'exploitation de son système et sur la gestion des situations où la qualité de la détection est faible.

Cependant, les procédures proposées par d'autres systèmes demeurent très génériques et peuvent être éventuellement appliquées au système iFerret.

En cas de dysfonctionnement d'une caméra, la société Stratech propose que les autres caméras prennent le relais de la caméra hors service en augmentant leur angle de rotation afin de couvrir la zone de piste concernée par la caméra défaillante.

7.2.3 - Conclusions

Le système apparaît répondre aux fonctions essentielles identifiées dans le chapitre 2 et ne pas poser de problème majeur d'implantation. Toutefois, des difficultés pourraient être rencontrées sur les doublets de pistes dotées d'un nombre important d'entrées / sorties.

Une attention est à apporter pour l'utilisation de ce système sur les pistes exploitées en conditions de faibles visibilité, les performances du système chutant à partir d'une visibilité de 350 mètres. Le système s'avérant peu fiable à partir de 155 mètres de visibilité.

L'entretien du système n'apparaît pas présenter de complexité majeure avec une durée de vie annoncée de 10 années.

Enfin, le système n'apparaît pas pouvoir être utilisé dans le cadre de la lutte contre le péril animalier.

Des tests de ce système sont indispensables pour confirmer ses performances, en particulier pour la nuit et par visibilité réduite (brouillard, faible luminosité, neige et pluie).

7.3 Le système Xsight (FODetect)

Préambule : L'analyse, présentée ici, repose sur la documentation fournie entre l'année 2006 et l'année 2008, par la société XSight. Il peut être envisagé que des modifications et améliorations techniques aient été apportées au système après cette période. Ainsi, les éléments d'analyse de cette section ne tiennent pas compte de ces nouvelles adaptations.

7.3.1 Description du système

Le système FODetect, développé par la société Xsight (Israël) a été spécifiquement conçu pour la détection d'objet sur les chaussées aéronautiques.

7.3.1.1 Principe de détection du système

Le système FODetect repose sur un fonctionnement indépendant de la technologie radar et de la technologie électro-optique (appelée optique par la suite). La détection est assurée par une fusion des données issues de ces deux technologies afin d'améliorer les résultats. Le choix de la technologie assurant la détection principale s'effectue automatiquement selon les conditions de visibilité. Lorsqu'un FOD est détecté, une image en temps réel est enregistrée, permettant à l'opérateur une reconnaissance visuelle de l'objet.

7.3.1.2 Les composants du système

↳ Le détecteur

Le système est composé de détecteurs couplés radar et optiques, l'ensemble a une hauteur de 13 pouces (soit environ 33 cm).

La caméra est de type CCD travaillant dans le domaine optique et dans le proche infrarouge avec une capacité de zoom.

Le radar est de type FMCW (Frequency Modulated Continuous Waves) dont la fréquence centrale est 76,5 GHz. Le document « Xsight FODetectTM FMCW Radar - Effective Radiate Power of Carrier Test Results » fournit plus de détail sur les caractéristiques de l'antenne radar.



Figure 57 : Détecteur combiné radar + caméra (source Xsight)

L'unité de détection vient se positionner conjointement, aux balises lumineuses hors sol de bord de piste (figure 57). Son positionnement est choisi afin de ne pas masquer la visibilité du feu pour les aéronefs.

Le nombre de détecteurs varie en fonction de la qualité de détection souhaitée, cependant le fabricant propose en standard un espacement de 60 mètres entre deux unités de détection, correspondant à l'espacement des balisages lumineux indiqué dans l'annexe 14 de la convention de Chicago relative à l'aviation civile internationale. Ces détecteurs sont implantés de part et d'autre de la piste (voir figure 58).

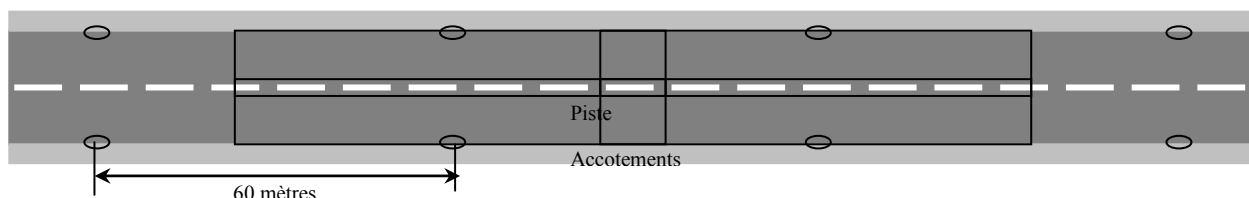


Figure 58 : Implantation des détecteurs sur la piste

Dans la mesure où le détecteur est installé aux abords immédiats de la piste, le support est équipé d'une bague cassante de manière à rendre l'ensemble frangible (voir figure 59).

**Frangible Coupler
and
Quick-Release Connector**



Figure 59 : Positionnement de la bague cassante (source Xsight)

L'unité de détection a été conçue selon les mêmes spécifications que le balisage de piste. Le constructeur s'est basé sur les standards de la FAA (frangibilité, résistance à un vent inférieur à 531 km/h et à une température de 55°C).

↳ Les équipements connexes

Chaque unité de détection comprend également un module contenant à la fois une unité de traitement et une unité de communication. Le module est dans une partie enterrée sous l'unité (partie sous la balise et le détecteur). Le reste du système est composé de la partie informatique d'exploitation.

↳ Les équipements d'exploitation

Les éléments de détection sont complétés de deux unités informatiques. La première servant à la gestion du système et la seconde à l'interface utilisateur.

↳ Fonction spécifique de localisation

Le système est doté d'une fonction spécifique de localisation des objets activant un pointeur laser placé sur les unités de détection. Ce pointeur permet d'illuminer, dans le visible, le lieu précis sur la piste où l'objet a été détecté, afin de faciliter et d'accélérer la récupération de l'objet détecté. Ce désignateur laser vise essentiellement à guider les agents chargés de la collecte de l'objet détecté de nuit. Ce pointeur a fait l'objet d'un agrément.

7.3.1.3 Architecture du système

Chaque unité de détection est connectée au système d'exploitation via un système filaire de type fibre optique, ou par communication sans fil (WiFi). Ces unités sont reliées au centre d'exploitation du système qui contient, en outre, une base de données des objets qui ont déjà été détectés.

L'architecture du système est représentée dans le synoptique suivant :

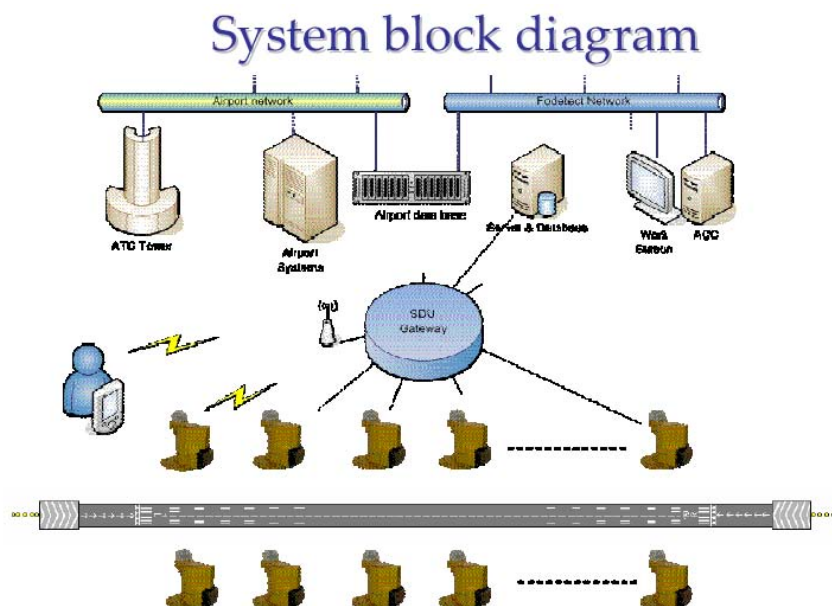


Figure 60 : Architecture du système FODetect (source Xsight)

7.3.1.4 Fonctionnement du système

↳ Principes de fonctionnement

Pour une piste de longueur 3 000 m, un nombre de 100 détecteurs est recommandé pour une installation standard. Selon les besoins de l'acquéreur en termes de fiabilité de détection, le nombre de détecteurs peut être augmenté ou réduit.

Les unités de détection sont implantées de part et d'autre de la piste et assurent une surveillance d'un secteur d'une largeur correspondant à l'intervalle entre deux unités et d'une profondeur correspondant à la moitié de la piste, avec des zones de recouvrement (ce schéma de principe ne reprend pas exactement la méthode de détection –voir figure 61).

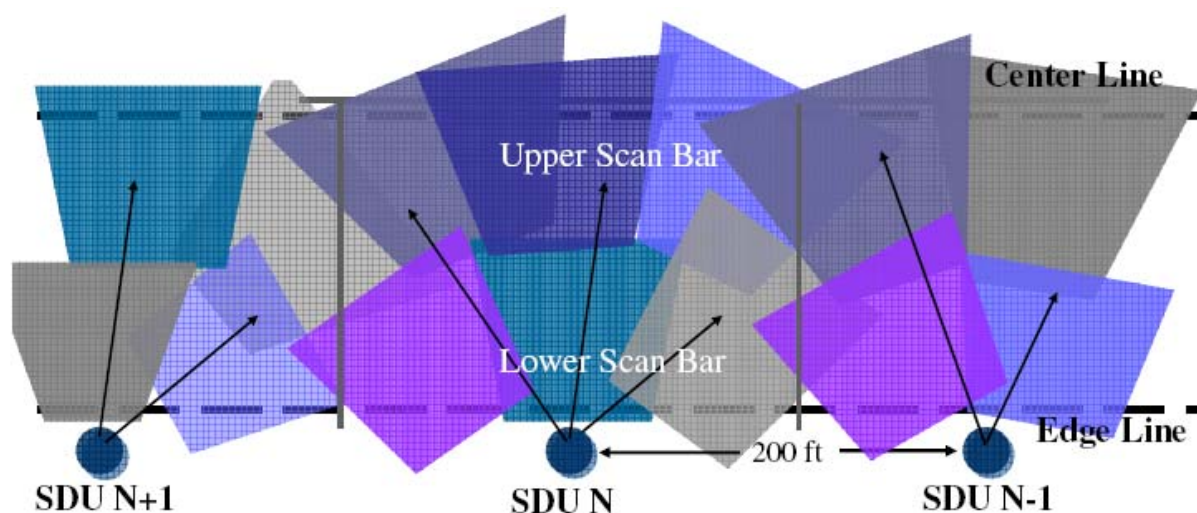


Figure 61 : Zone de détection par unité de détection (source Xsight)

Les secteurs affectés à chaque unité de détection sont décomposés en zones de détection réparties selon le principe illustré par la figure 61 (le nombre de zones est toutefois supérieur à 6). Afin d'assurer une couverture totale, la détermination de ces zones est programmée automatiquement par chaque unité en tenant compte de sa position et des dimensions de son secteur de contrôle. La détection est assurée d'abord dans les zones les plus proches de l'unité, puis dans les zones éloignées.

L'information en provenance de chaque unité de détection est traitée localement puis transmise dans le cas où le traitement donne lieu à une détection. En cas d'alarme, le système fournit alors une information de localisation précise à 50 centimètres près. Cette localisation par le système permet le ramassage rapide de l'objet par un véhicule disponible (si celui-ci est équipé d'un système de navigation GPS, le système permettant un guidage GPS jusqu'à la localisation de l'objet détecté).

Le système effectue une détection continue permanente, quelles que soient les conditions météorologiques, de visibilité (brouillard notamment), et de jour comme de nuit. Par ailleurs, le système FODetect est également efficace dans la détection des objets métalliques et non métalliques tels que les pierres, les matières plastiques, synthétiques et organiques.

↳ Les modes de fonctionnement

⇒ L'interface utilisateur

L'interface graphique affiche un plan de la piste où sont indiqués les différents objets détectés. Une alarme sonore et visuelle permet d'informer l'utilisateur de la détection d'un objet. L'utilisateur a la possibilité d'effectuer des zooms manuels sur la zone de la piste où un objet a été repéré avec une identification de l'unité de détection concernée. Il peut également utiliser une des caméras adjacentes afin d'obtenir un point de vue différent de l'objet. Les caméras assurent une bonne visibilité de jour comme de nuit, grâce à une capacité de vision dans le proche infrarouge. A noter que l'image délivrée à l'opérateur est l'image vue par la caméra, sans traitement préalable.

En outre, l'interface graphique fournit à l'opérateur des informations relatives à la taille de l'objet (hauteur et largeur), lui permettant d'apprécier l'objet. La précision de la mesure est de l'ordre de quelques centimètres.

L'interface comprend également une liste des objets détectés, permettant à l'utilisateur de sélectionner les alertes en fonction des besoins. Parallèlement, un système de mémorisation des actions associées est également prévu. Il permet à l'utilisateur de consulter la base de données des alertes antérieures.

L'interface permet enfin de suivre l'état de fonctionnement des unités de détection (voir figure 62), avec une alerte en cas de dysfonctionnement d'une unité.

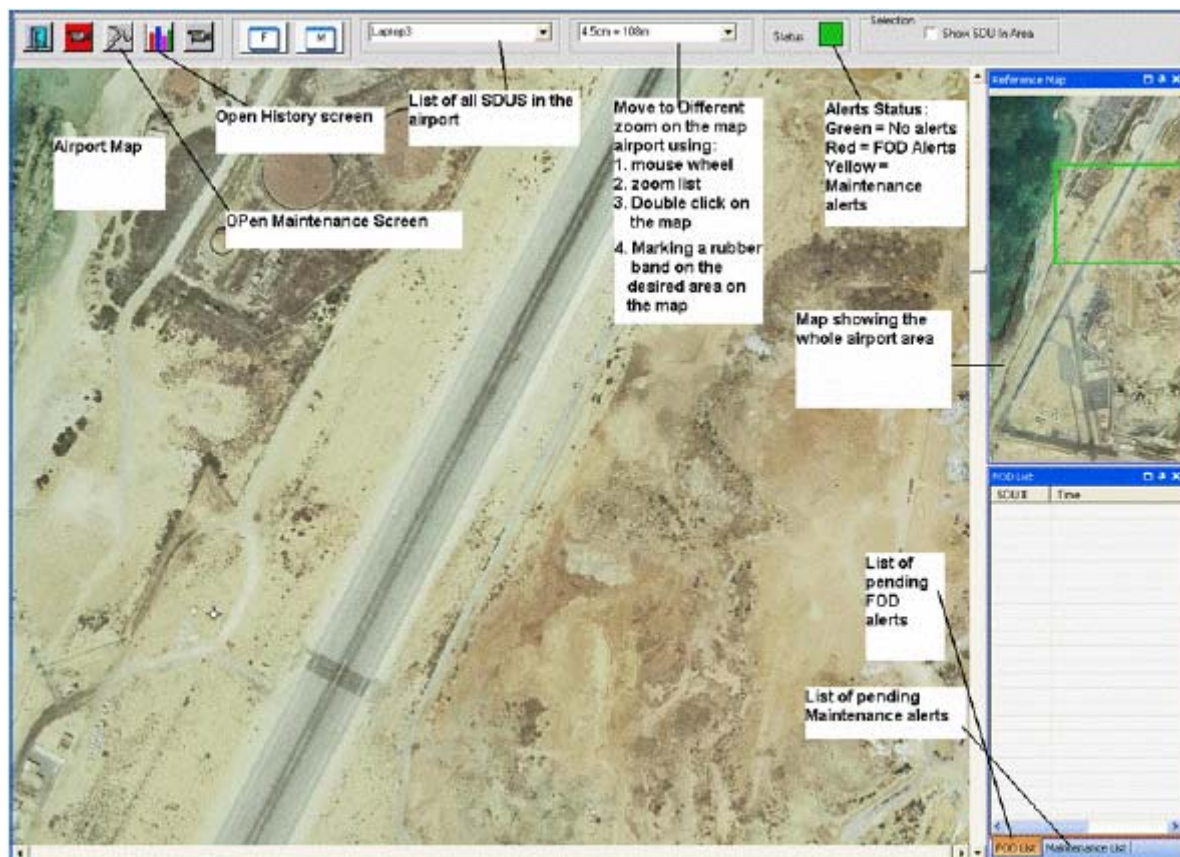


Figure 62 : Interface principale utilisateur du système FODetect (source Xsight)

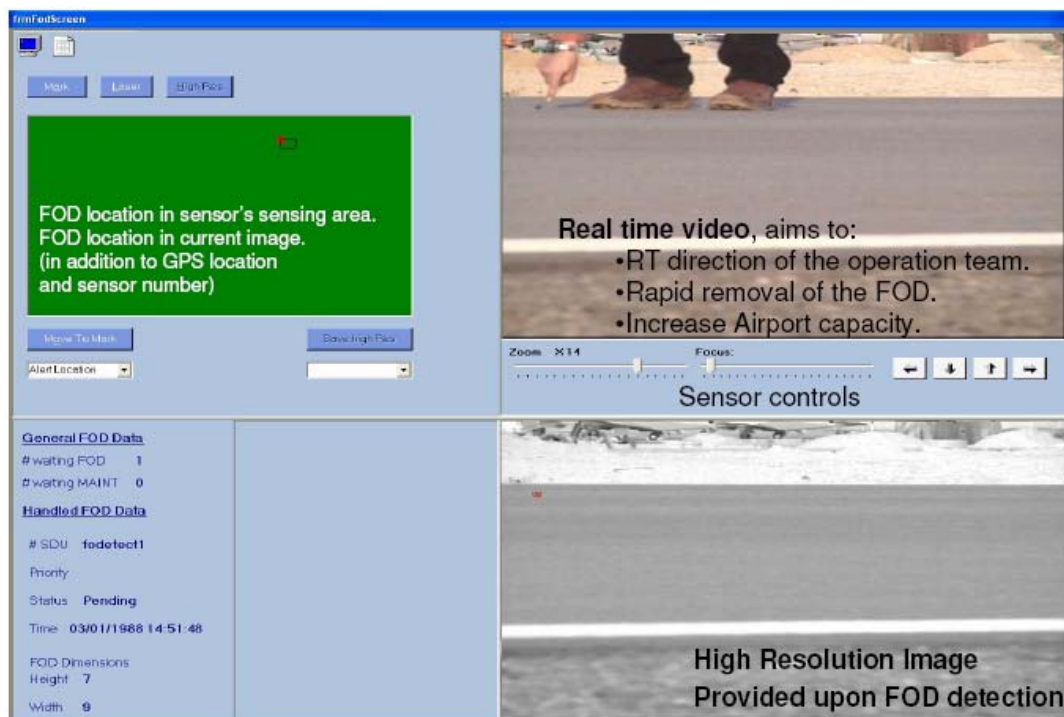


Figure 63 : Ecran de visualisation des objets détectés (source Xsight)

⇒ **Fonctionnement en mode dégradé**

En cas de dysfonctionnement d'une unité de détection, le système en avise automatiquement l'opérateur et reconfigure les unités de détection adjacentes qui augmentent le secteur de détection pour couvrir la zone qui était affectée à l'unité défaillante.

7.3.1.5 Performances

En condition sèche et de jour, le système peut détecter des objets d'un diamètre de 2,5 cm dans toute la section couverte avec une probabilité élevée (supérieure à 99%) et un taux de fausses alarmes faible. Le système assure également, avec une probabilité plus faible, la détection d'objets dont le diamètre avoisine 1 cm.

Toutefois, cette performance de détection est altérée par les conditions de visibilité et météorologiques. Les pertes de performances restent encore à affiner par le fabricant. Ce dernier assure cependant un fonctionnement de son système pendant des approches de précision de catégorie IIIb.

Le système FODetect assure une détection des objets quelles que soient leur matière constitutive, leur couleur et leur forme, grâce à l'utilisation d'une double technologie de détection, chacune permettant de compenser la sensibilité de l'autre.

Le système localise les objets à 50 cm près.

7.3.1.6 Expériences

Le système a été développé entre 2001 et 2006. Depuis 2006, il est entré dans une phase de production. Le système est en cours de commercialisation, mais aucune installation opérationnelle sur un aéroport civil n'a encore été réalisée.

Le système a toutefois été installé sur une base aérienne israélienne et le système est en cours de test par la FAA à l'aéroport international de Boston Logan depuis la fin de l'été 2007. Les résultats de ces tests n'ont pas encore été rendus publics.

7.3.2 Analyse du système

7.3.2.1 Eléments sur les choix techniques

↳ **L'unité de détection**

Le choix d'une unité de détection composée d'un détecteur radar et d'un détecteur optique est particulièrement judicieux : l'utilisation combinée de deux technologies de détection permet d'étendre le domaine d'utilisation du système au-delà des domaines d'utilisation propres à chaque détecteur, d'augmenter la probabilité de détection et de réduire le taux de fausses alarmes. En effet, les systèmes radar sont sensibles à la forme et à la matière, mais insensibles à la couleur des objets et à l'inverse, les systèmes optiques sont sensibles à la couleur, mais peu à la forme et insensibles à la matière. De plus, le système radar est moins sensible aux conditions de visibilité et permet l'utilisation du système malgré une visibilité réduite.

En outre, la détection optique dans le proche infrarouge permet d'atténuer l'impact d'une visibilité réduite, sans toutefois s'en affranchir (le système peut opérer dans les conditions de visibilité d'une approche de catégorie IIIB).

Le radar est de type FMCW et fonctionne en gamme millimétrique. Le choix d'une fréquence centrale de 76,5 GHz est approprié compte tenu des propriétés d'absorption atmosphérique des ondes à cette fréquence et de la distance de détection.

Ainsi que cela a déjà été souligné, le choix d'une onde millimétrique permet d'obtenir une sensibilité permettant la détection d'objets de petite taille. En effet pour une longueur d'onde donnée (λ), la limite théorique de résolution est égale à la demi longueur d'onde ($\lambda/2$). Le radar fonctionne avec une longueur d'onde d'environ 4 mm. Dans la réalité, le seuil de détection est un peu plus élevé et dépend de la SER de l'objet et du filtre permettant d'éliminer le bruit de fond.

↳ **Le système**

Le système a été conçu de manière à assurer une maintenance aisée. Ainsi, chaque tête de détecteur peut être remplacée aisément, l'unité de détection hors service pouvant être renvoyée chez le fabricant ou réparée sur place si cela est possible. Par ailleurs, les coûts de remplacement des unités de détection sont relativement limités.

Il existe deux types d'implantation des unités de détection. Dans le cas de feux de bord de piste hors sol, ils seront directement installés aux côtés des feux. Néanmoins, la méthode d'implantation des unités de détection implique que ces feux de bord de piste soient remplacés par des unités hors sol avec un support spécifique supportant la tête du feu et celle du détecteur. Dans le cas de feux encastrés, les unités de détection seront installées séparément sur une structure indépendante sur les accotements ou en dehors de la piste et de ses accotements.

Au vu du nombre de détecteurs, il aurait été possible d'assurer une vision stéréoscopique, cependant, compte tenu des capacités du système (informations sur la taille de l'objet, possibilité de vision de l'objet selon plusieurs angles de vue) et de la double détection, celle-ci n'apparaît pas utile.

⇒ **Interface homme – machine**

L'interface du système semble adaptée aux besoins des utilisateurs avec une lisibilité satisfaisante. Elle permet en effet de disposer d'un affichage de l'aéroport, des pistes, de la localisation des détecteurs, de leur état de fonctionnement, ainsi que d'un aperçu visuel des objets détectés accompagné d'informations comme leur localisation, leur suivi (liste des alertes et de leur statut), et de l'historique du traitement des alertes. Toutefois,

les informations fournies par le fabricant montrent plusieurs fenêtres qui s'affichent en plein écran et qui selon leur ordre d'affichage peut perdre l'utilisateur lors de la prise en main du système.

7.3.2.2 Réponse aux exigences

↳ Réponse aux exigences fonctionnelles

⇒ **Fonction de détection et d'alerte automatique**

Le système assure une détection des objets étrangers continue et sans perturbation directe du trafic. Lorsque la présence d'un objet intrus est décelée, l'unité de détection enregistre une image de l'objet. Dans le même temps, le système informe automatiquement l'opérateur de la détection, de manière visuelle et sonore. Deux modes sont alors possibles.

- le premier : une fois l'objet détecté, le capteur se verrouille sur l'objet en attendant une action de l'opérateur ; celui-ci pourra ainsi consulter l'image enregistrée par le système ainsi que l'image en temps réel de l'objet ; ce mode permet de privilégier la rapidité d'action vis-à-vis du danger potentiel ;
- le second : une fois l'objet détecté, le système fournit une alarme, affiche l'image enregistrée mais le détecteur impliqué continue sa détection sur le reste de sa zone ; ce mode permet de privilégier la surveillance par rapport à la rapidité d'action.

⇒ **Fonction de localisation**

Lorsqu'un objet est détecté, le système assure une localisation des objets détectés à 50 centimètres près permettant une collecte aisée des objets étrangers. Une telle précision n'est peut-être pas nécessaire actuellement compte tenu de la précision des appareils GPS disponibles dans le commerce (dont la précision peut atteindre les 3 mètres).

⇒ **Fonction de confirmation**

Le système est doté d'une fonction de confirmation automatique et indépendante. En effet, les unités de détection utilisent deux méthodes de détection : optique et radar.

Le détecteur optique permet de plus de fournir à l'opérateur une image de l'objet détecté. Cette image n'est pas traitée par le système aussi, les possibilités de fausses alarmes sont réduites.

⇒ **Fonction d'identification**

Le système permet également de comparer l'objet détecté avec une base de données des objets collectés antérieurement afin d'aider l'opérateur dans sa décision sur le moment le plus opportun pour procéder à la collecte de l'objet.

Cependant, cette base de données sera construite au fur et à mesure de l'utilisation du système et ne sera pas utilisable immédiatement.

Enfin, une première information sur la taille de l'objet est fournie à l'opérateur.

↳ Réponse aux exigences opérationnelles

⇒ **Période de détection**

Le système assure une détection permanente (hors période de maintenance et pannes).

⇒ **Compatibilité aéroportuaire**

Ce point est traité dans le titre 7.3.2.3.

⇒ **Conditions de fonctionnement**

Le système est conçu pour fonctionner de jour comme de nuit, dans toutes les conditions météorologiques. Néanmoins, des réductions de performances sont possibles (voir paragraphe suivant sur les exigences de performances).

⇒ **Réponse aux exigences de performances**

⇒ **Caractéristiques des objets étrangers détectés**

Le système est doté d'un filtre logique visant à supprimer les « objets légitimes » (aéronef, personnes, véhicule). Pour cela, il se base sur la taille de l'objet et non son mouvement comme d'autres systèmes.

Le seuil de 2,5 cm annoncé par le fabricant est dans la limite de la recommandation sur la taille des objets détectés et n'apparaît pas incohérent avec la technologie de détection utilisée (optique et radar). Ce seuil peut être abaissé, mais probablement avec une augmentation du taux de fausses alarmes.

De part sa conception, le système apparaît être en mesure de s'affranchir des autres caractéristiques des objets (couleur, forme, matière) et de limiter les risques de non détection liés à la position de l'objet par rapport au détecteur (faiblesse des systèmes purement radar).

Une diminution des performances du système est possible selon les conditions météorologiques, cependant, compte tenu du double système de détection, le domaine d'utilisation du système est large. L'utilisation possible du système optique jusqu'à une RVR d'environ 50 m permet de couvrir l'ensemble des types d'exploitation des aérodromes français (le système ne sera pas totalement opérationnel pendant les opérations par approche de précision de catégorie IIIc), en deçà, il devra se reposer uniquement sur la détection radar.

Néanmoins, le fabricant ne dispose pas encore d'une évaluation des réductions de performances en fonction de la météorologie (intensité de pluie et de neige, ainsi que par temps de brouillard). Une évaluation pratique est nécessaire. Xsight a ainsi profité de la campagne de test de son système à Boston pour évaluer ses performances durant la période hivernale 2008.

⇒ **Caractéristiques des animaux détectés**

Le système offre la possibilité de détecter des objets en mouvement. Néanmoins, la détection est assurée en direction de la piste, aussi seuls les animaux posés au sol sont susceptibles d'être détectés. A noter qu'une modification logicielle de la configuration du système peut être nécessaire pour ajouter ces alertes. Xsight souligne également la proximité de ses détecteurs de la piste, ce qui peut éventuellement permettre au service de péril animalier d'obtenir des photos des animaux en présence de bonne qualité et ainsi de les identifier.

⇒ **Réponse sur la zone de détection**

La détection sur la piste semble efficace. En ce qui concerne les accotements, l'implantation des détecteurs aux côtés des balises de bord de piste pouvait laisser craindre une couverture partielle des accotements. Toutefois, les unités de détection sont conçues pour couvrir un angle de 360°. Selon Xsight, il suffirait ainsi d'une modification logicielle pour que les surfaces situées entre les balises de bord de piste et la bande de piste soient également prises en charge. En effet, les moteurs extérieurs d'aéronefs tels que le B747 et l'A380 peuvent être amenés à surplomber les accotements. Leur couverture paraît ainsi nécessaire afin de réduire les risques d'ingestion d'objets.

Bien que Xsight indique que son système peut potentiellement détecter des objets dans la bande de piste avec toutefois une forte dégradation des performances, une telle utilisation ne paraît pas pertinente, eu égard à l'environnement complexe des bandes enherbées.

↳ Réponse sur le temps de détection

Le système a été conçu afin que le temps nécessaire à la détection soit cohérent avec le rythme des mouvements. Ainsi, le temps nécessaire au système pour déclencher une alarme est de 30 secondes, temps de balayage de chaque secteur compris dans des conditions standards. Dès lors, l'opérateur dispose d'un délai de quelques secondes pour analyser l'alarme à l'aide d'une vue en temps réel avec possibilité d'agrandissement et décider du caractère dangereux de l'objet. Le déclenchement de la procédure de collecte de l'objet étranger relève toutefois de la décision du contrôle aérien sur indication de l'opérateur. Le fabricant annonce un temps de traitement (entre l'apparition de l'objet et la décision d'enlèvement) de 20 secondes. Dans le cas où plusieurs objets sont détectés, ce temps sera néanmoins certainement plus long. Par ailleurs, le temps d'analyse apparaît assez optimiste surtout si l'opérateur doit déterminer le danger que représente la présence de l'objet sur la piste et passer à travers la chaîne de décision (l'exploitant évalue le danger et demande aux services du contrôle aérien, l'arrêt des opérations sur la piste).

Ce temps de détection s'il se confirme est idéal. En effet, il permet de garantir qu'entre chaque mouvement sur la piste, le système est capable de relever la présence d'un objet étranger. Il convient néanmoins de s'assurer que les conditions météorologiques ou de visibilité n'affectent pas ce délai.

7.3.2.3 *Eléments sur la compatibilité aéroportuaire*

↳ Compatibilité avec les contraintes d'implantation

Les unités de détection du système FODetect sont implantées sur l'accotement de la piste, conjointement avec les balises de bord de piste.

Réglementairement, la question de qualifier ce dispositif d'aide à la navigation aérienne et de l'autorisation de sa présence aux abords d'une piste reste posée. Ce point devra être éclairci avant que l'exploitant de l'aérodrome ne puisse implanter le système. En raison de son rôle pour la sécurité aérienne, une telle autorisation semble possible sous réserve que la frangibilité de l'ensemble (tête de détection et feux de bord de piste) soit évaluée et jugée acceptable. A cet égard, aux Etats-Unis, la FAA a d'ores et déjà autorisé l'implantation de ce système sur une piste pour une campagne de test en condition normale d'exploitation à l'aéroport international de Boston Logan.

Si l'implantation des unités de détection sur l'accotement de la piste est acceptée, le système ne présente pas d'incompatibilité majeure avec les infrastructures aéroportuaires. Néanmoins, quatre remarques sont ainsi à faire :

- les unités de détection ne peuvent pas être implantées sur les voies d'entrées/sorties de la piste, ce qui implique une discontinuité dans le positionnement des unités (de une à trois unités peuvent ne pas pouvoir être implantées à ces endroits) ; dans ce cas de figure, les unités de détection adjacentes devront prendre le relais, ou d'autres unités dédiées à ces zones pourront être implantées afin de maintenir les performances de temps de détection ;
- les unités de détection sont prévues pour être fixées conjointement avec des feux hors sol ; dans le cas des feux de balisage encastrés, le fabricant prévoit une installation séparée, soit sur les accotements, soit à proximité dans la bande aménagée. si, comme précisé précédemment, la question de qualifier ce dispositif d'aide à la navigation aérienne reste posée, il apparaît utile de préciser que les unités de détection sont fabriquées afin de respecter les normes applicables au balisage lumineux ;
- tout comme le balisage hors sol, les unités de détection, de part leur implantation, peuvent être elles-mêmes sources d'objets étrangers lorsqu'elles sont endommagées, le principal danger venant de la masse de la partie hors sol du détecteur ; le risque généré est très réduit puisqu'une alerte est émise en cas de problème, signalant immédiatement à l'opérateur un dysfonctionnement du système ;

- le déneigement des pistes peut endommager le système ; en effet, tout comme le balisage lumineux de bord de piste, la partie hors-sol³ des détecteurs peut être brisée lors des opérations de déneigement en vigueur sur l'aérodrome. Le taux de détecteurs brisés est difficile à estimer, toutefois, une première approximation peut être faite sur la base du taux connus d'endommagement des feux de bord de piste lors de ces opérations ; si ce taux est important, il pourra poser tant un problème économique pour l'exploitant, qu'un problème lié à l'indisponibilité du système ; toutefois, le système de FODetect est conçu de manière à ce que les détecteurs puissent être aisément remplacés et la redondance de la détection peut permettre de pallier un arrachage ponctuel (non consécutifs) des détecteurs.

Ainsi, sous réserve que les unités de détection fasse l'objet d'une autorisation d'implantation sur la piste, et que les quatre remarques soient prises en compte, le système ne présente pas d'incompatibilité avec les fonctions des infrastructures aéroportuaires.

↳ **Compatibilité avec les équipements aéronautiques**

Le système est composé de deux détecteurs. Le détecteur optique est passif, aussi, aucune interaction n'est possible entre l'unité et les différents équipements optiques et radioélectriques de l'aérodrome.

Le détecteur radar utilise la longueur d'onde de 77 GHz qui ne présente pas, tant au niveau de la puissance que de la longueur d'onde, d'incompatibilité avec les équipements radioélectriques.

Par contre, de par sa conception, le système pourrait créer des effets de masque des feux sous certains angles. Les unités de détection sont toutefois de taille inférieure à celle de la balise et situées orthogonalement à l'axe de piste, aussi, pour un avion placé en hauteur et en amont de la balise, ce risque est limité, voire nul. Xsight indique qu'une simulation a été effectuée à ce sujet.

Le système nécessite l'existence d'un réseau de fibres optiques ou WiFi pour acheminer l'information vers les unités de traitement vidéo. Ce point nécessite une expertise de compatibilité supplémentaire afin de s'assurer qu'aucune perturbation des différents équipements aéroportuaires et aéronautiques ne soit à noter. Un mode de communication par fibre optique semble préférable à condition que l'aérodrome en soit doté (sinon, l'installation du système nécessite un coût supplémentaire).

En conclusion, le système ne présente pas d'incompatibilité, à ce stade de l'étude, avec le fonctionnement des équipements de l'aérodrome.

↳ **Compatibilité avec l'exploitation de l'aérodrome**

⇒ **Impact sur les personnes et les avions**

Pour la partie radar, le système fonctionne dans une gamme qui ne présente pas d'incompatibilité évidente avec les avions et les équipements radioélectriques d'aide à la navigation aérienne (puissance et longueur d'onde).

La partie optique des détecteurs étant passive, il n'y a pas d'impact évident sur les avions.

Enfin, le système est doté d'un composant laser pour le pointage visuel des objets. Le fabricant a assuré lors des entretiens que la puissance du laser était dimensionnée pour ne pas présenter de risque pour les yeux (laser de classe IIIa qui sont conçus pour ne pas provoquer de blessures, mais qui peuvent présenter un risque dans le cas d'utilisation d'éléments optiques focalisants), cependant, aucune attestation n'a été fournie.

Par contre, compte tenu de leur implantation à proximité de la piste, les possibilités d'encrassement des unités optiques sont possibles et devraient être évaluées bien que des dispositions ont été prises par Xsight avec notamment un mécanisme de nettoyage intégré. L'expérience actuelle ne permet pas d'avoir de réponse sur ce point.

³ La partie sensible du détecteur est située sous le détecteur et ne serait pas endommagée par l'arrachage du détecteur

⇒ **Impact sur la capacité**

Le système FODetect propose une détection permanente des objets sur la piste qui ne nécessite pas l'arrêt des opérations. Aussi, sur le plan de la détection d'objet, le système n'a pas d'impact sur la capacité de l'aérodrome.

La société Xsight prévoit l'utilisation d'assistants personnels où les objets sont repérés, ce qui permet de faciliter la procédure d'enlèvement et d'accélérer l'enlèvement de l'objet sur la piste.

⇒ **Exploitation du système**

Conformément au document spécifiant les procédures d'exploitation fournie par la société Xsight [53], la principale console de commande pourra être localisée soit dans le centre opérations de l'exploitant d'aérodrome, soit auprès des services de navigation aérienne. Dans le premier cas, un poste additionnel pourra être implanté dans la tour de contrôle, la décision d'interrompre les opérations relevant des services de navigation aérienne. Pour une utilisation du système dans le premier mode (verrouillage du détecteur sur l'objet), la procédure ci-suivante est un résumé du document [53].

- **Détection :**

- FODetect scanne continuellement les zones couvertes par le système ;

si un objet est détecté, le système envoie des alertes visuelle et sonore sur la console de commande qui affichera la localisation de l'objet sur un schéma de l'aéroport ; suivant la taille de l'objet et son emplacement, l'alerte sera hiérarchisée comme normale à grave.

- **Approbation et classification :**

- l'opérateur clique sur l'icône alerte. L'image de l'objet enregistrée lors de la détection est affichée ainsi qu'une vidéo en temps réel ;
- les informations suivantes sont aussi affichées : image, coordonnées, distance de l'axe de la piste, dimensions de l'objet, heure de détection, le temps écoulé depuis la dernière non-détection ;
- l'opérateur peut prendre le contrôle de l'unité de détection mobilisée et effectuer un agrandissement et un focus sur l'objet. Il peut, de la même manière, se servir d'une caméra adjacente pour obtenir un point de vue différent ;
- l'opérateur classe l'objet dans l'un des trois niveaux de gravité suivants :
 - niveau 3 – risque élevé : l'objet doit être collecté dès que possible ;
 - niveau 2 – risque modéré : l'objet doit être collecté dès que le trafic le permet ;
 - niveau 1 – risque réduit : l'objet doit être collecté durant la prochaine inspection de piste.

- **Collecte de l'objet**

- dans les cas des niveaux 2 et 3, l'opérateur transmet l'alerte, son niveau de gravité et l'emplacement de l'objet aux services de navigation aérienne, par le biais du poste additionnel le cas échéant ;
- selon les conditions de trafic et les informations transmises, le contrôle aérien décide alors de l'action à mener ;
- dès l'approbation des services de navigation aérienne, la piste est fermée et l'équipe de collecte est avertie ;
- l'équipe de collecte est dirigée à l'aide d'une ou plusieurs informations selon leur disponibilité : les coordonnées GPS, le numéro du balisage lumineux, le laser-pointeur contrôlé par l'opérateur ou un pilotage à partir des informations vidéos de l'opérateur ;

- l'équipe de collecte averti l'opérateur de la collecte et effectue une description de l'objet ;
- l'opérateur averti les services de navigation aérienne qui rouvre la piste au trafic.
- Report d'évènement :
 - l'opérateur met à jour la base de données des objets trouvés sur piste à l'aide de la console et clôture l'évènement. Le détail des actions et les images sont également stockés dans la base de données.
- Identification de la source de l'objet :
 - dans le cas où l'objet provient d'un aéronef :
 - le temps estimé du dépôt de l'objet (estimé à l'aide du temps écoulé entre la dernière non-détection et la détection de l'objet) et la description de l'objet sont acheminés aux services de navigation aérienne ;
 - les services de navigation aérienne comparent le temps estimé de dépôt aux données de trafic ;
 - les services de navigation aérienne avertissent l'équipage de l'aéronef et celui-ci décide des actions à mener.
 - dans le cas où l'objet ne provient pas d'un aéronef et/ou il a été trouvé sur une partie de piste utilisée fréquemment par des véhicules ; l'objet peut être comparé aux véhicules ayant emprunté cette partie de piste durant le temps estimé du dépôt ;
 - si le système FODetect est équipé d'un système d'identification optique avec une fonction d'archivage, les véhicules peuvent être identifiés à l'aide des images enregistrées pour l'endroit et l'heure en question.

Le fabricant n'a pas fourni d'informations relatives aux procédures sur la gestion des situations où la qualité de la détection est faible. Cependant, en cas de dysfonctionnement d'une caméra, le système s'adapte automatiquement en permettant aux unités de détection adjacentes de prendre le relais (avec une baisse de performance).

7.3.3 Conclusions

Le système développé par la société Xsight apparaît répondre aux fonctions essentielles identifiées dans le chapitre 2 et ne pas poser de problème majeur d'implantation sur un aérodrome. Néanmoins, la question de qualifier ce dispositif d'aide à la navigation aérienne devra être éclaircie avant qu'une implantation ne puisse être autorisée.

Ce système offre des capacités intéressantes liées à l'utilisation combinée de deux méthodes de détection. Le taux de fausses alarmes et le seuil de détection sont annoncés bas, ce qui n'est pas incompatible avec les choix techniques. C'est de plus le seul système qui intègre des possibilités avancées d'identification. Ce point est à nuancer compte tenu du manque d'expérience en matière de danger que peuvent représenter les objets étrangers sur les pistes d'aérodrome.

Le coût du système est bien entendu proportionnel à la longueur de la piste (compte tenu du nombre de détecteurs). Le fabricant prévoit un coût de remplacement des unités de détection qui permet de garantir un coût d'entretien réduit en cas de panne d'une unité de détection. Par ailleurs, de par leur conception, les têtes sont aisément changeables et peuvent être réparées sur place par l'exploitant, ce qui réduit la complexité des réparations.

Bien que le système n'ait pas été conçu dans une perspective de lutte contre le péril animalier (il n'y a pas d'alerte spécifique pour les animaux), comme tout système basé sur de l'optique, il peut permettre une visualisation des espèces présentes sur la piste et ses abords immédiats, ce qui facilite le choix des actions

d'effarouchement à appliquer. La rapidité de la détection du système offre l'avantage d'un plus grand nombre d'alarme liée à la présence d'animaux qui représentent eux aussi un risque pour les aéronefs.

7.4 Système LaserOptronix (Global FOD Grabber)

A l'occasion de la réalisation de l'étude, un système était en cours de développement. Il a ainsi été analysé au même titre que les trois systèmes précédents.

Ce système étant basé sur une technologie différente des autres systèmes, il a été retenu de conserver l'analyse faite en 2007 et de la porter en annexe c.

8 Conclusion générale

8.1 - Conclusions sur les systèmes

8.1.1 - Sur l'utilité de tels systèmes

L'évolution des technologies permet aujourd'hui d'avoir des systèmes apportant une réelle plus-value par rapport aux inspections visuelles de piste qu'ils ne peuvent encore prétendre remplacer (ces inspections visuelles dépassent, par ailleurs, le cadre de la seule détection d'objets) mais au moins compléter. Par ailleurs, de tels systèmes offrent la possibilité de mieux identifier le moment où un objet apparaît sur la piste, ce qui permettra aux exploitants de mieux lutter contre les sources d'objets, par exemple en identifiant de manière relativement sûre l'aéronef qui a perdu une pièce retrouvée sur la piste.

En particulier, de tels systèmes offrent des perspectives intéressantes pour les aérodromes avec des pointes de trafic fréquentes et approchant du seuil de capacité de l'aérodrome. En effet, pendant ces pointes de trafic le risque de présence d'un objet étranger est plus important, or à ce moment là l'intervention d'une équipe d'inspection est particulièrement lourde sur le trafic.

Quelques aérodromes ont déjà décidé de se doter de tels systèmes ou sont en contact avec leurs fabricants en vue de leur acquisition ou location.

8.1.2 - Sur les systèmes existants

L'analyse documentaire des systèmes existants montre qu'une utilisation peut aujourd'hui être raisonnablement envisagée sur les aérodromes où ils apporteront une plus-value réelle. Les systèmes semblent en effet répondre aux exigences et recommandations minimales pour de tels systèmes, telles qu'identifiées dans le cadre de cette étude. Néanmoins, cette analyse nécessite d'être confirmée par des tests sur site afin de confirmer les conclusions de l'étude, basées sur la documentation technique remise par les fabricants.

Il est indispensable que ces systèmes soient dotés d'une fonction de visualisation des objets détectés. En effet, en l'absence d'autres informations relatives au risque que peut représenter un objet étranger, il revient à l'opérateur d'identifier clairement l'objet incriminé et d'évaluer avec certitude l'action à mener. Les systèmes ne disposant pas d'une fonction de visualisation ne devraient pas être retenus comme pertinents.

Si cette étude n'a pu se procurer les données relatives aux taux de fausses alarmes, une attention tout particulier devra être apportée à ces taux de fausses alarmes que ces systèmes sont susceptibles de générer. En effet, la multiplicité des fausses alarmes peut rendre totalement inefficace le système, avec un impact sur la capacité dû au déplacement inutile des équipes de patrouille et les opérateurs étant susceptibles, à terme, de ne plus prendre en compte les informations délivrées par le système. Les fabricants assurent un taux de fausses alarmes contenu, cependant quelques doutes sont aujourd'hui permis dans certaines conditions météorologiques et de faible visibilité. Le domaine de fiabilité des systèmes n'est pas toujours connu avec exactitude par leurs fabricants.

Il est à noter que les systèmes proposés actuellement sur le marché restent d'un coût élevé (environ 2 millions d'euros). Ainsi, leur acquisition (ou location) est possible pour les exploitants disposant d'une capacité de financement conséquente. L'achat de tels systèmes par les autres exploitants d'aérodrome impose une réduction importante du coût d'achat/location. Au cours de l'étude, il a été constaté le lancement de projets de développement de tels systèmes qui seraient dès lors susceptibles de concerner plus d'aérodromes.

8.1.3 - Sur l'évolution de la réglementation

Il apparaît aujourd'hui prématuré que de tels systèmes puissent être mentionnés dans la réglementation ou dans des guides techniques comme moyens de remplacement total ou partiel des inspections de piste (du moins pour la partie relative à la collecte des objets étrangers).

En effet, ainsi que mentionné précédemment, des tests doivent être réalisés pour confirmer l'analyse des systèmes.

Il apparaît par ailleurs qu'une meilleure connaissance des objets étrangers susceptibles de se trouver sur les pistes est à développer (les données collectées à ce jour permettant difficilement d'évaluer les caractéristiques des objets étrangers susceptibles de constituer un danger).

Enfin, la mention dans la réglementation ou dans des guides techniques de tels systèmes impliquerait au minimum une qualification, pour ne pas dire un agrément, des systèmes proposés. En l'état actuel des choses seule leur utilisation sur les aérodromes à fortes pointes de trafic peut être recommandée en plus des inspections visuelles.

8.2 - Perspectives

8.2.1 - Nécessité de conduire des tests

Des tests restent indispensables pour confirmer les performances des systèmes. Trois types de tests sont possibles :

- installation des systèmes sur des aérodromes à fort trafic ; cette option offre l'avantage d'avoir créé les infrastructures qui seront nécessaires pour l'installation définitive des systèmes (si les tests sont positifs) et de mesurer pleinement l'impact des systèmes sur les opérations aériennes ; cette option offre le désavantage de perturber l'exploitation de la piste pendant les périodes de test ;
- installation des systèmes sur des aérodromes à faible trafic ; cette option offre l'avantage de faciliter la conduite des tests avec des objets prédéterminés, cependant il est peu probable que ces systèmes soient implantés de manière définitive sur ces aérodromes : les infrastructures de test seront perdues et il sera difficile de mesurer l'impact sur le trafic ;
- réalisation de tests avec des infrastructures minimales ; cette option permet de limiter le coût des tests, cependant, la qualité des résultats en sera affectée (par exemple, manque de stabilité des caméras optiques, vibration des systèmes radar et laser).

8.2.2 - Veille technique

Un certain nombre de projets de développement sont actuellement en cours (voir annexe 3). Les technologies utilisées sont assez proches de celles déjà exploitées (radar et optique). L'intérêt qui peut être porté à ces projets concerne surtout la volonté de certains développeurs de contenir le coût afin d'augmenter le nombre de clients potentiels.

Par ailleurs, des améliorations des techniques de détection sont possibles afin d'augmenter la performance et la fiabilité de la détection. Par exemple, l'utilisation d'une vision stéréoscopique pour la détection permettrait de compenser l'absence d'un système de confirmation et faciliter l'identification des objets.

8.2.3 - Amélioration de la connaissance des objets étrangers

Peu de données sur les objets étrangers collectés sont actuellement disponibles, tant sur la collecte et l'archivage des informations sur les objets ramassés que sur les conséquences de la présence de ces objets

sur les aéronefs. Il est proposé de profiter de la parution récente de l'arrêté relatif aux notifications d'événements, qui mentionne les objets étrangers comme devant être notifiés, pour assurer un suivi de ces objets collectés. Cependant, plusieurs informations devraient être collectées pour assurer une exploitation satisfaisante :

- photo de l'objet tel qu'il se présente avant d'être ramassé ; information difficile à obtenir compte tenu de son impact sur la durée de l'intervention ;
- photo de l'objet dans les trois dimensions sur une grille permettant d'apprécier ses dimensions ;
- localisation longitudinale de manière aussi précise que possible ;
- localisation transversale de l'objet (piste, accotement, bande aménagée, bande dégagée ou voie d'accès à la piste) ;
- couleurs de l'objet (autant de valeur qu'il y a de couleurs dominantes) ;
- matière principale de l'objet en volume ;
- matière extérieure de l'objet ;
- circonstances du ramassage (lors d'une inspection programmée ou d'une inspection demandée) ;
- origine de l'objet (aéronef, piste, balisage, outil, etc.) ;
- cause de la présence de l'objet (si possible) ;
- conséquence de la présence de l'objet (dommages à un aéronef –avec description des parties touchées-, atterrissage de prudence, retard, aucune).

Cette collecte d'information sera à compléter par un travail de classification, afin de préciser les objectifs de détection et définir les normes techniques préalables à l'homologation de tels matériels qui sera nécessaire si la réglementation s'appuie à terme sur leurs capacités. Ce travail nécessite d'être réalisé à une échelle plus importante de manière à ce que les normes ne soient pas uniquement françaises mais au moins européennes.

Cette analyse est un préliminaire indispensable à tout agrément ou certification de matériel.

8.2.4 - Elargissement du domaine d'utilisation de tels systèmes

Les systèmes identifiés ne semblent pas pouvoir être aujourd'hui utilisés dans le cadre de la lutte contre le péril animalier, notamment parce qu'ils ne permettent pas de suivre les objets en mouvement. Par ailleurs, dans un souci d'économie d'installation de systèmes, il serait particulièrement intéressant que les fabricants étudient la possibilité d'étendre les capacités de ces systèmes à la détection d'animaux et à la lutte contre les intrusions de piste.

Bibliographie

Référence	Document
[1]	Rapport final f-sc000725p du BEA relatif à l'accident survenu le 25 juillet 2000 au lieu-dit La Patte d'Oie de Gonesse (95) au Concorde immatriculé F-BTSC exploité par Air France, bureau d'enquêtes et d'analyses pour la sécurité de l'aviation civile
[2]	Rapport du BEA relatif à l'accident survenu le 20 janvier 1995 sur l'aérodrome du Bourget au Falcon 20 E immatriculé F-GHLN exploité par la Compagnie LEADAIR UNIJET (f-ln950120)
[4]	Mohamed Bénallal, Système de calibration de caméra – Localisation de forme polyédrique par vision monoculaire, thèse de l'Ecole des Mines de Paris, soutenue le 29 novembre 2002.
[5]	Hervé Mathieu, La chaîne d'acquisition d'images, rapport technique de l'INRIA, décembre 2000.
[6]	Vannary Meas-Yedid, Jean-Philippe Tarel, André Gagalowicz, Calibration métrique faible et construction interactive de modèles 3D de scènes, Actes du 9 ^{ème} congrès AFCET, Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle, février 1994, Paris France
[7]	Mohamed Zayed, Véhicules Intelligents : Etude et développement d'un capteur intelligent de vision pour l'attelage virtuel, thèse de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, soutenue le 12 juillet 2005
[8]	K. Sarabandi, M. Park, "Millimeter-Wave Radar Phenomenology of Power Lines and a Polarimetric Detection Algorithm", IEEE Trans. on Antennas & Propag. Vol. 47, No.12, 1999, pp.1807-1813.
[9]	Convention relative à l'aviation civile internationale
[10]	Annexe 14 de l'OACI relative à conception et à l'exploitation technique des aérodromes (volume 1 : Aérodromes)
[11]	Arrêté du 15 mars 2002 relatif aux inspections de l'aire de mouvement de l'aérodrome (abrogé)
[12]	Manuel relatif aux inspections de l'aire de mouvement de l'aérodrome (15 mars 2002)
[13]	Manuel de prévention des dommages causés par des objets sur l'aire de mouvement de l'aérodrome (15 mars 2002)
[14]	Arrêté du 6 mars 2008 relatif aux inspections de l'aire de mouvement d'un aérodrome
[15]	Décret n° 2007-432 du 25 mars 2007 relatif aux normes techniques applicables au service de sauvetage et de lutte contre l'incendie des aéronefs sur les aérodromes de Mayotte, des îles Wallis et Futuna, de Polynésie française et de Nouvelle-Calédonie ainsi qu'à la prévention du péril animalier sur les aérodromes
[16]	Arrêté du 24 juillet 1989 modifié relatif à la prévention du péril aviaire sur les aérodromes dont l'affectataire principal est le ministre chargé de l'aviation civile
[17]	Arrêté du 10 avril 2007 relatif à la prévention du péril animalier sur les aérodromes
[18]	Arrêté du 30 novembre 2006 relatif à la mise en place d'un système de gestion de la sécurité par les exploitants d'aérodrome

- [19] C. Migliaccio, B. D. Nguyen, Ch. Pichot, N. Yonemoto, K. Yamamoto, K. Yamada, H. Yasui, W. Mayer, A. Gronau, W. Menzel, "Millimetre Wave Radar for Rescue Helicopters", Invited presentation, 9th International Conference on Control, Automotion, Robotics and Vision (ICARV2006), 5-8 December 2006, Singapore.
- [20] Vincent Delaye, Etude et réalisation d'un télémètre laser par temps de vol, thèse de l'INPG, soutenue le 7 septembre 2000.
- [21] Ground Penetrating Radar-2d edition, David J. Daniels, IEE Press, IEE Radar, Sonar and Navigation series 15, 2004, ISBN 0863413609.
- [22] Radars Millimétriques pour Anticollision, P.A Rolland, N. Haese, D. Cailleu, P. Deloof, cours dispensé à l'USTL.
- [23] P. Beasley, G. Binns, R. Hodges, R.J Badley, Tarsier., "A Millimetre Wave Radar for Airport Runway Debris Detection", European Radar Conference 2004, Amsterdam.
- [24] Naruto Yonemoto, Kazuo Yamamoto, Kimio Yamada "Performance of obstacle detection and collision warning system for civil helicopters", Proc. of SPIE, 19 May 2006 vo. 6226.
- [25] Pierre Charbonnier, Outils d'exploitation d'images numériques, présentation LCPC, 18 mai 2005.
- [26] White Paper July 2007.doc, Tarsier: An Automatic Foreign Object debris Inspection System for Airport Runways, Dr. Sima Adhya, QINETIQ/QAT/TR0700014, July 2007.
- [27] Concept of Operations Manual July 2007.doc, Tarsier Concept of Operation Manuals, Dr. Sima Adhya, QINETIQ/QAT/UG070004, July 2007.
- [28] 2007 Tarsier System Description.pdf, Tarsier Runway Debris Detection Monitoring System: System Description, Dr. D. Walker, QINETIQ/QINETIQ/QAT/PDD0700013, July 2007.
- [29] S. Drabowitch, A. Papiernik, H. Griffiths, J. Encinas, Modern Antennas, First Edition, Chapman & Hall, London, Wien, New-York, 1998, ISBN 0412579103.
- [30] C.A. Balanis: Antenna Theory - Analysis and design, second edition John Wiley & Sons, Inc., 1996, ISBN 0-471-59268-4.
- [31] iFerret for dgac.pdf, iFerret™ intelligent Airfield/Runway Surveillance & Foreign Objects & Debris (FOD) Detection System, Commercial-in-Confidence.
- [32] Chew.pdf, iFerret™ intelligent Airfield/Runway Surveillance and FOD Detection System, Dr. David Chew, 17 April 2007, Commercial-in-Confidence.
- [33] RunwaySurveillance.pdf, iFerret™ intelligent Airfield/Runway Surveillance & FOD Detection System.
- [34] RunwaySurveillance (plus récent).pdf, iFerret™ intelligent Airfield/Runway Surveillance & FOD Detection System.
- [35] Camilla Kärnfelt et al., "Investigation of Parylene-C on the Performance of Millimeter-Wave Circuits", IEEE MTT, vol 54, No.8, pp.3417-3425, August 2006.
- [36] W. Mayer, M. Meilchen, W. Grabherr, P. Nüchter, R. Gühl, "Eight Channel 77GHz Front-End Module With High-Performance Synthesized Signal Generator for FM-CW Sensor Applications", IEEE MTT, vol 52, No.3, pp.993-1000, March 2004.
- [37] Tarsier EMC certification.pdf, Certificate of Test, QinetiQ/D&TS/SS/TC0605513, QINETIQ proprietary.
- [38] Documentation Internet LaserOptronix.pdf,

- [39] Test system Arlanda-2006-09.pdf, FOD Test at Arlanda Sept. 2006, Summary of results and related comments.
- [40] QinetiQ proprietary, Tarsier performance in rain, 2007
- [41] Arrêté du 28 août 2003 modifié relatif aux conditions d'homologation et aux procédures d'exploitation des aérodromes
- [42] Plaquette d'information Stratech « Intelligent Airfield/runway Surveillance and FOD (Foreign Object and debris) detection system » remise le 20 décembre 2007
- [43] iFerret Product summary 3.0 remise par Stratech le 20 décembre 2007
- [44] Vidéo de démonstration fournie par Stratech : iFerret - Airport Night Scene.wmv remise le 20 décembre 2007
- [45] Vidéo de démonstration fournie par Stratech : iFerret Day Demo.wmv remise le 20 décembre 2007
- [46] Vidéo de démonstration fournie par Stratech : iFerret Night Demo.wmv remise le 20 décembre 2007
- [47] Arrêté du 28 août 2003 modifié relatif aux conditions d'homologation et aux procédures d'exploitation des aérodromes
- [48] Company Profile – Xsight Systems Ltd. Décembre 2007
- [49] Plaquette de présentation du système « Foreign object Debris Detection system – Automated system for monitoring of airport airside surfaces »
- [50] Ficher “Reply to DGAC questions.doc” remis en décembre 2007 par la société.
- [51] Xsight FODetect™ FMCW Radar - Effective Radiate Power of Carrier Test Results (5 novembre 2006)
- [52] Présentation du système FODetect en décembre 2007
- [53] Directive européenne 2003/42/CE du Parlement européen et du Conseil du 13 juin 2003 concernant les comptes rendus d'événements dans l'aviation civile

Glossaire

Terme	Explication
Capteur	Le capteur est l'élément d'interface transformant le signal électromagnétique provenant d'un objet détecté, en un signal électrique : la surface photosensible d'une caméra est un exemple.
CCD	Charge-Coupled Device (type de capteur optique)
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique
CNRS	Centre National de Recherche Scientifique
DAST	Direction des affaires stratégiques et techniques
Détecteur	Le détecteur est le dispositif contenant le capteur et constituant l'équipement de base du système : une caméra vidéo numérique est considérée dans ce document comme un détecteur.
DGAC	Direction générale de l'Aviation civile
DSP	Digital signal processing (unité de traitement du signal)
FAA	Federal aviation administration
FMCW	Frequency Modulated Continuous Waves (Ondes continues modulées en fréquence)
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning system
IBIS	ICAO Bird Strike System
ITAC	Instruction technique sur les aérodromes civils
LEAT	Laboratoire d'électronique, antennes et télécommunication (université de Nice Sophia Antipolis – affilié au centre national de recherche scientifique)
LVP	Procédure en basse visibilité (low visibility procedure)
MMS	Multimedia Messaging Service
OACI	Organisation de l'aviation civile internationale
PICA	Programme d'Informations sur les Collisions Aviaires
SER	Surface Equivalente Radar
SMS	Short Messaging Service
STAC	Service technique de l'Aviation civile
Système de détection	Le système est l'ensemble des équipements constituant la chaîne de détection d'un objet, proposé par un fabricant. La chaîne de détection comprend le détecteur, le réseau de transmission de données, le dispositif de traitement de données, l'interface homme machine.
WiFi	Wireless Fidelity

Annexes

Sommaire des annexes

ANNEXE A : EXTRAITS DE LA REGLEMENTATION INTERNATIONALE ET FRANÇAISE	116
1 Dispositions de l'annexe 14 de l'OACI	116
1.1 Dispositions relatives à la prévention des débris	116
1.2 Dispositions relatives à la lutte contre le péril animalier	117
2 Dispositions applicables en France	117
2.1 Dispositions relatives aux débris sur les pistes d'aérodrome	118
2.2 Dispositions relatives à la lutte contre le péril animalier	118
 ANNEXE B – PRESENTATION SUCCINCTE DES SYSTEMES IDENTIFIES DANS LE CADRE DE LA RECHERCHE, MAIS NON RETENUS	 119
1 - Système TADAR	119
2 Le système Vigiscan	119
3 Le système IROD	120
4 Le projet CEA	120
 ANNEXE C : CAS PARTICULIER DU SYSTEME LASEROPTRONIX	 122
1 Description du système	122
1.1 Principe de détection du système	122
1.2 Les composants du système	122
1.2.1 Caractéristiques du détecteur	122
1.2.2 L'implantation des détecteurs	123
1.3 Architecture du système	123
1.4 Fonctionnement du système	124
1.5 Performances	124
1.6 Expériences	125
2 Analyse du système	126
2.1 Eléments sur les choix techniques	126
2.1.1 Eléments sur le détecteur	126
2.1.2 Eléments sur l'architecture du système	126
2.2 Réponse aux exigences	127
2.2.1 Réponse aux exigences fonctionnelles	127
2.2.2 Réponse aux exigences opérationnelles	127
2.2.3 Réponse aux exigences de performances	128
2.2.4 Réponse sur la zone de détection	128
2.2.5 Réponse sur le temps de détection	128
2.3 Eléments sur la compatibilité aéroportuaire	129

2.3.1 Compatibilité avec les contraintes d'implantation	129
2.3.2 Compatibilité avec les équipements aéronautiques	129
2.3.3 Compatibilité avec l'exploitation de l'aérodrome	129
3 Conclusions	130

Annexe A : EXTRAITS DE LA REGLEMENTATION INTERNATIONALE ET FRANÇAISE

1 Dispositions de l'annexe 14 de l'OACI

Ci-dessous sont reprises les normes et pratiques recommandées de l'annexe 14 [10] à la convention de l'aviation civile internationale [9].

1.1 Dispositions relatives à la prévention des débris

§2.9.1- Des renseignements sur l'état de l'aire de mouvement et le fonctionnement des installations connexes seront communiqués aux organismes appropriés des services d'information aéronautique, et des renseignements analogues, importants du point de vue opérationnel, seront communiqués aux organismes des services de la circulation aérienne, afin de leur permettre de fournir les renseignements nécessaires aux avions à l'arrivée et au départ. Ces renseignements seront tenus à jour et tout changement sera signalé sans délai.

§2.9.2- L'état de l'aire de mouvement et le fonctionnement des installations connexes seront surveillés et des comptes rendus seront communiqués sur des questions intéressant l'exploitation ou influant sur les performances des aéronefs, notamment sur ce qui suit :

- travaux de construction ou d'entretien;
- parties irrégulières ou détériorées de la surface d'une piste, d'une voie de circulation ou d'une aire de trafic;
- présence de neige, de neige fondante ou de glace sur une piste, une voie de circulation ou une aire de trafic;
- présence d'eau sur une piste, une voie de circulation ou une aire de trafic;
- congères ou amoncellements de neige à proximité d'une piste, d'une voie de circulation ou d'une aire de trafic;
- présence d'agents chimiques liquides de déglacage sur une piste ou une voie de circulation;
- autres dangers temporaires, y compris les aéronefs en stationnement;
- panne ou irrégularité de fonctionnement de la totalité ou d'une partie des aides visuelles de l'aérodrome;
- panne de l'alimentation électrique normale ou auxiliaire.

§2.9.3- Recommandation.— Il est recommandé, pour faciliter l'application des dispositions des § 2.9.1 et 2.9.2, d'effectuer des inspections de l'aire de mouvement au moins une fois par jour lorsque le chiffre de code est 1 ou 2, et au moins deux fois par jour lorsque le chiffre de code est 3 ou 4.

A noter ici qu'un projet d'amendement est en cours à l'OACI visant à transformer en norme la recommandation 2.9.3.

1.2 Dispositions relatives à la lutte contre le péril animalier

Les dispositions relatives à la lutte contre le péril aviaire sont définies dans l'annexe 14 [10] à la convention de l'aviation civile internationale [9].

§9.4.1 Les risques d'impacts d'oiseaux aux aérodromes ou à proximité seront évalués à l'aide :

- d'une procédure nationale d'enregistrement et de communication des cas d'impacts d'oiseaux sur les aéronefs;
- des renseignements recueillis auprès des exploitants d'aéronefs, du personnel des aéroports, etc., sur la présence, à l'aérodrome ou à proximité, d'oiseaux pouvant constituer un danger pour les aéronefs.

§9.4.2 Les comptes rendus d'impacts d'oiseaux seront collectés et communiqués à l'OACI pour qu'ils soient entrés dans la base de données du système OACI d'information sur les impacts d'oiseaux (IBIS).

Note.— L'IBIS est conçu pour recueillir et diffuser des renseignements concernant les impacts d'oiseaux sur des aéronefs. Pour tout renseignement concernant ce système, prière de consulter le Manuel du système OACI d'information sur les impacts d'oiseaux (IBIS).

§9.4.3 Lorsque l'existence d'un risque aviaire est reconnue sur un aérodrome, l'autorité compétente prendra des dispositions pour réduire le nombre des oiseaux qui constituent un danger potentiel pour les aéronefs en adoptant des mesures visant à décourager leur présence sur l'aérodrome ou à proximité.

Note.— Le Manuel des services d'aéroport, 3e Partie, contient des indications sur les mesures efficaces permettant de déterminer si la présence d'oiseaux sur un aérodrome ou à proximité constitue un danger potentiel pour les aéronefs et sur les méthodes propres à en décourager la présence.

§9.4.4 L'autorité compétente prendra les dispositions nécessaires pour éliminer les décharges, dépotoirs ou tout autre point d'attraction semblable pour les oiseaux situés aux aérodromes et à proximité et empêcher qu'il en soit créé, sauf si une étude aéronautique appropriée indique qu'il est peu probable que les conditions ainsi établies n'entraînent l'existence d'un risque aviaire.

Note.— Il faut tenir dûment compte des préoccupations des exploitants d'aéroport concernant les aménagements des terrains situés près des aéroports qui risquent d'attirer des oiseaux/animaux.

A noter qu'un projet d'amendement de l'annexe précitée est en cours de préparation à l'OACI et vise à étendre la lutte contre le péril aviaire à la lutte contre le péril animalier, à l'instar de ce qui a été fait en France (voir paragraphe 2.2 de la présente annexe). Notamment, la norme 9.4.3 redéfinit l'objectif de la lutte contre les animaux sauvages :

§9.4.3 Des dispositions seront prises pour réduire le risque pour les aéronefs en adoptant des mesures visant réduire au minimum les probabilités de collision entre les animaux sauvages et les aéronefs.

2 Dispositions applicables en France

Les dispositions applicables en France sont introduites par un décret et trois arrêtés :

- le décret n° 2007-432 du 25 mars 2007 relatif aux normes techniques applicables au service de sauvetage et de lutte contre l'incendie des aéronefs sur les aérodromes de Mayotte, des îles Wallis et Futuna, de Polynésie française et de Nouvelle-Calédonie ainsi qu'à la prévention du péril animalier sur les aérodromes [15] ;
- l'arrêté du 15 mars 2002 relatif aux inspections de l'aire de mouvement de l'aérodrome [11] ;
- l'arrêté du 6 mars 2008 relatif aux inspections de l'aire de mouvement d'un aérodrome [14]

- l'arrêté du 24 juillet 1989 modifié relatif à la prévention du péril aviaire sur les aérodromes dont l'affectataire principal est le ministre chargé de l'aviation civile [16] ;
- l'arrêté du 10 avril 2007 relatif à la prévention du péril animalier sur les aérodromes [17].

2.1 Dispositions relatives aux débris sur les pistes d'aérodrome

Au niveau national, ces spécifications sont transcrites dans la réglementation française par l'arrêté du 6 mars 2008 relatif aux inspections de l'aire de mouvement d'un aérodrome [14]. Cet arrêté prévoit, entre autres, d'effectuer des inspections visuelles des aires de mouvement afin de repérer et d'enlever, notamment, les objets ou débris constituant des dangers temporaires. Les autres exigences de l'arrêté concernent d'autres objectifs ou précisent la réalisation et l'organisation de ces inspections visuelles.

Pour les aérodromes dotés d'un organisme de la circulation aérienne, il est nécessaire d'effectuer ces inspections :

- au moins trois fois par jour pour une piste en service recevant une ligne commerciale régulière et dont le trafic attendu est supérieur à 40 000 mouvements lors de la saison hivernale et 60 000 mouvements lors de la saison estivale ;
- au moins deux fois par jour pour une piste en service recevant au moins une ligne commerciale régulière ;
- au moins une fois par jour pour une piste en service présentant des conditions de trafic différentes, entre 4 heures et 7 heures du matin (heure locale) ou avant la prise de service du prestataire de services de navigation aérienne s'il existe sauf lorsque aucun mouvement n'est attendu dans la journée.

2.2 Dispositions relatives à la lutte contre le péril animalier

Les exigences réglementaires sont supportées par le décret n° 2007-432 du 25 mars 2007 relatif aux normes techniques applicables au service de sauvetage et de lutte contre l'incendie des aéronefs sur les aérodromes de Mayotte, des îles Wallis et Futuna, de Polynésie française et de Nouvelle-Calédonie ainsi qu'à la prévention du péril animalier sur les aérodromes [15]. Ce décret prévoit notamment que la prévention du péril animalier concourt à la sécurité des vols. Elle vise à réduire les risques de collision entre les aéronefs et les animaux, lors des opérations de décollage et d'atterrissage.

Ce décret est complété par deux arrêtés. L'arrêté du 10 avril 2007 relatif à la prévention du péril animalier sur les aérodromes [16] et l'arrêté du 24 juillet 1989 modifié relatif à la prévention du péril aviaire sur les aérodromes dont l'affectataire principal est le ministre chargé de l'aviation civile [16]. Ces arrêtés précisent les méthodes permettant de limiter les risques de collision entre les aéronefs et les animaux, mais ne précisent pas les méthodes de détection de présence d'animaux sur ou à proximité de la piste.

Annexe B – Présentation succincte des systèmes identifiés dans le cadre de la recherche, mais non retenus

1- Système TADAR

Le système Tadar utilise un dispositif restituant une image à partir de la mesure du rayonnement thermique en provenance des objets. Il s'agit d'une méthode de mesure radiométrique passive des émissions thermiques des objets, étalées sur tout le spectre électromagnétique avec des intensités variables. Le système Tadar propose un système d'imagerie opérant à une fréquence de 94 Ghz où l'atténuation atmosphérique est minimale. Les dimensions des objets détectés demeurent importantes.

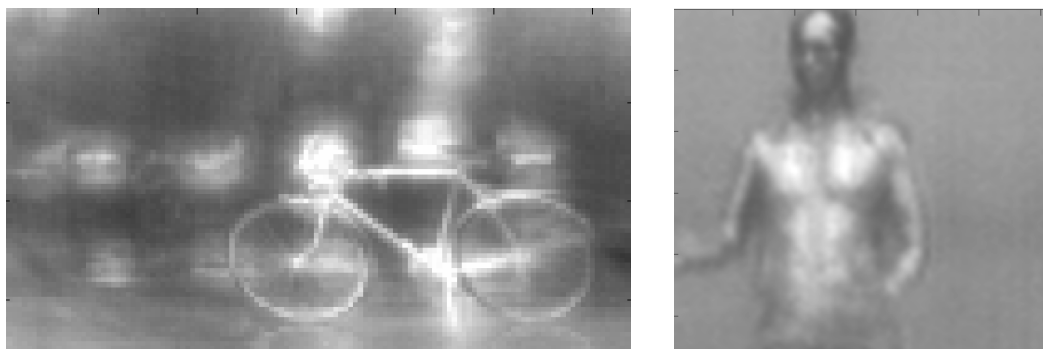


Figure 64 : Images obtenues à partir de mesures radiométriques

2 Le système Vigiscan

Le système VIGISCAN développé par la société HGH repose sur un système de surveillance panoramique qui permet de réaliser une image infrarouge de l'espace sur 360°. La vue panoramique est réalisée grâce à une caméra à tête pivotante, détectant le rayonnement infrarouge lors d'une intrusion en espace dégagé. La distance de détection d'une personne dans l'obscurité est estimée jusqu'à 1 km.



Figure 65 : Détection d'intrusion en vision panoramique infrarouge

3 Le système IROD

Le produit IROD repose sur un système de surveillance par caméra thermique. Ce système de surveillance par imagerie thermique pour les espaces découverts permet la détection automatisée sur une portion de terrain des intrusions de nuit ou par mauvaises conditions de visibilité. Ce système de surveillance reconnaît automatiquement les objets qui correspondent à des critères d'alarmes prédéfinis.

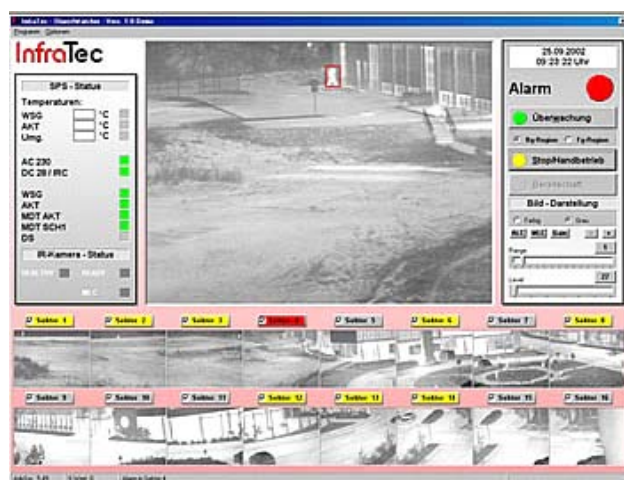


Figure 66 : A gauche, une alarme est déclenchée par la présence d'une personne dans une zone de détection. A gauche, image thermique d'une personne détecté par le système

4 Le projet CEA

Dans son programme de recherche et développement, le CEA a entrepris la réalisation d'un prototype de caméra piloté par un microprocesseur reconfigurable, ayant des performances de traitement des données

supérieures aux microprocesseurs actuellement sur le marché. L'application dédiée de ce prototype est la télésurveillance, mais aussi la détection d'objets. Néanmoins, la commercialisation de cette caméra n'est pas encore programmée.



Figure 67 : Localisation d'un piéton par caméra reconfigurable

Annexe C : Cas particulier du système LaserOptronix

1 Description du système

Le système Global FOD Grabber, développé par la société LaserOptronix (Suède) a été spécifiquement conçu pour la détection d'objet sur les chaussées aéronautiques.

A l'heure actuelle, son développement n'est pas achevé. Des tests doivent être poursuivis pour apprécier son exploitation en environnement aéroportuaire.

1.1 Principe de détection du système

Le système LaserOptronix est un système de détection active utilisant un radar laser infrarouge, dédié à la détection d'objet sur les chaussées aéronautiques.

1.2 Les composants du système

A l'heure actuelle, seul le détecteur est en cours de développement. Aussi, les composants autres que le détecteur ne sont pas connus.

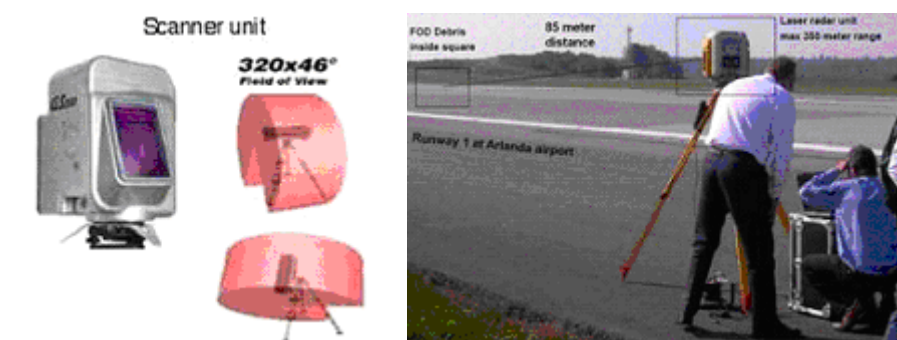


Figure 68 : Détecteur laser (source LaserOptronix)

Le détecteur utilisé par la société LaserOptronix peut effectuer des mesures en mode azimutal (horizontal) ou en mode élévation (vertical). Les tests de distance sur piste se sont effectués à une centaine de mètre. La portée maximale du détecteur est 350 m.

1.2.1 Caractéristiques du détecteur

Le détecteur est un radar laser infrarouge dont les données sont résumées ci-dessous [38]:

- technique de mesure : Laser radar ;
- balayage : 90° en élévation et 360° en azimut ;
- précision de la mesure : ± 2 mm ($\pm s$), et ± 3 mm à 100 m ($\pm s$) ;

- émetteur : diode laser infrarouge ;
- classe laser : 1 (sans danger) ;
- ouverture du faisceau : 0,5 mm à 1m et 3 mm à 100 m ;
- températures extérieures supportables : de -30° à 40° ;
- hauteur d'installation : type. 600 mm ;
- dimensions : 500*500*400 mm ;
- poids : 12kg ;
- caméra CCD à résolution super VHS.

1.2.2 L'implantation des détecteurs

La hauteur prévue pour son implantation en milieu aéroportuaire est 1 m. Les caractéristiques du support utilisé ne sont pas indiquées dans la documentation. Les distances d'implantation prévues, par rapport à l'axe de piste, sont de 100 m (seuils) et 200 m (reste de la piste).

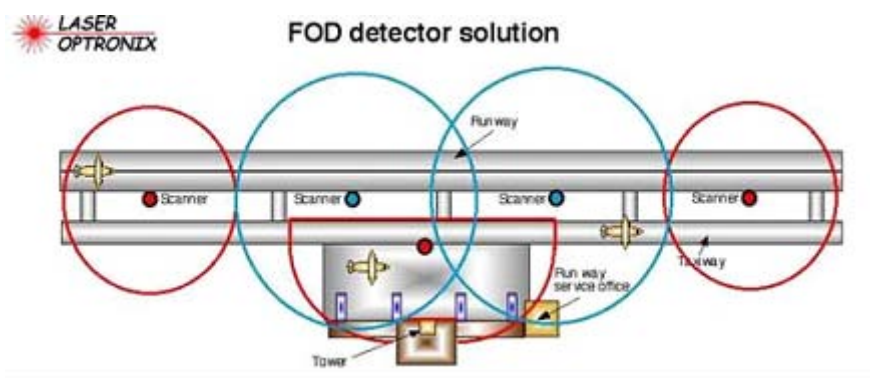


Figure 69 : Synoptique de l'installation des détecteurs (source LaserOptronix)

Dans la figure précédente, deux zones sont définies avec une précision de détection différente.

Les extrémités de pistes (zones rouges) sont particulièrement surveillées en raison d'une vitesse des aéronefs plus élevée aux seuils de piste (avec donc des risques plus importants nécessitant une meilleure détection). Par ailleurs, ce choix d'implantation proche est également dicté par le fait que cette zone est propice à de fortes turbulences atmosphériques ainsi qu'à la présence de particules en suspension dans l'atmosphère perturbant fortement le signal du détecteur, d'où une nécessité de précision de détection plus importante.

Le reste de la piste (zones bleues) où la sensibilité de la détection peut être un peu moindre en raison de risques liés aux objets moins élevés, ainsi que d'une moindre importance des turbulences.

1.3 Architecture du système

Bien que son développement ne soit pas encore achevé, l'architecture suivante est prévue :

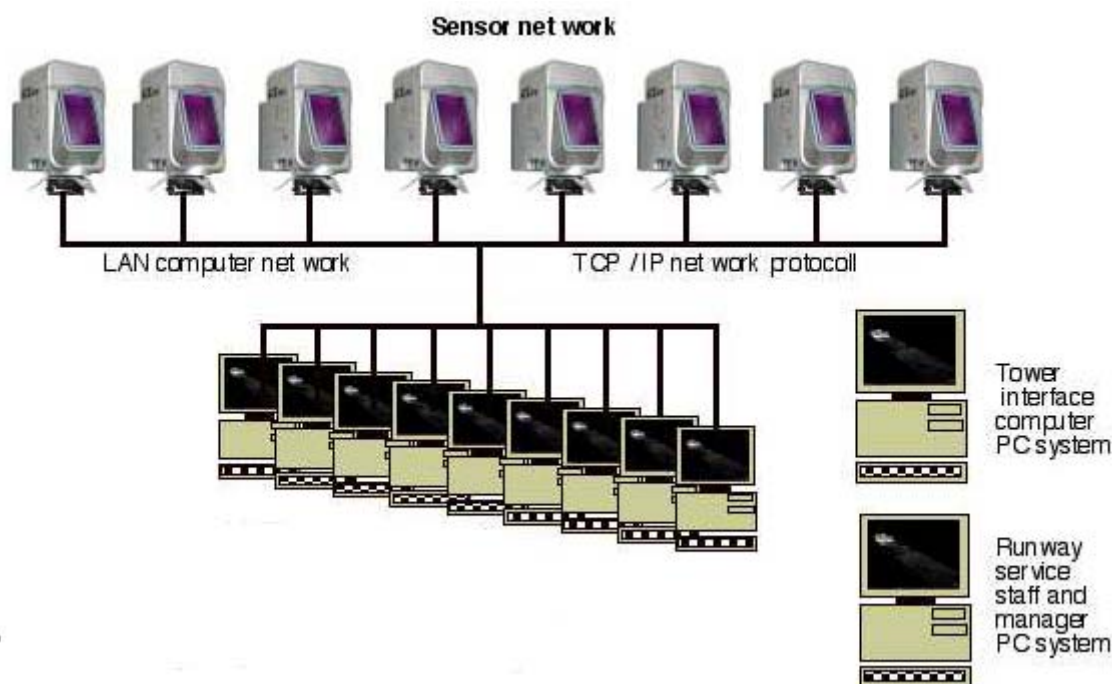


Figure 70 : Architecture du système de LaserOptronix (source LaserOptronix)

Chaque détecteur est piloté par un microordinateur effectuant tous les calculs (détection des variations du sol). Un microordinateur "Maître" reçoit toutes les informations des différents microordinateurs attachés à chaque détecteur.

1.4 Fonctionnement du système

Le système est en cours de développement. Les tests de repérage ont été effectués directement à partir du détecteur. L'interface utilisateur et le système d'automatisation restent encore à développer.

Le système prend quelques minutes pour couvrir la zone à surveiller.

1.5 Performances

En fonction de la distance de détection, la précision de la localisation varie.

Dans les zones où la portée du détecteur est de 100 à 150 mètres, le seuil de détection est de 10 à 15 mm (zones rouges dans la figure 69) et dans les zones où la portée du détecteur est de 150 à 250 mètres, le seuil de détection est de 20 à 30 mm (zones bleues dans la figure 69) [38].

La portée maximale du détecteur est 350 m. La dimension donnée de l'objet peut être fournie au centimètre près [38] avec une localisation de l'ordre du centimètre [39].

La précision de la détection est assurée quelles que soient les conditions de luminosité.

Le système est capable de détecter les oiseaux sur les pistes considérés comme des objets en mouvement.

En période hivernale, il peut aussi renseigner sur l'épaisseur de la couche de neige sur les pistes.

1.6 Expériences

Des essais ont été effectués sur l'aéroport d'Arlanda, Stockholm, Suède, en septembre 2006 [39] où des débris ont été posés en bord de piste à une distance de 85 m du scanner avec des conditions météorologiques excellentes (beau temps avec ensoleillement). La largeur de la piste est de 45 m. Le détecteur a été placé en bord de piste à 2 hauteurs différentes (1,5 m et 1,1 m). Les débris s'étendaient sur une largeur totale de 60 à 70 cm. Les mesures sont effectuées selon une matrice de pas 2*5mm.

Les débris choisis sont représentés sur la figure 71, leurs dimensions et leur constitution sont données ci-dessous :

- boulon métallique 200 mm de long, tête hexagonale de 15 mm.
- pierre granitique 15*15*20 mm,
- pierre granitique 25*30*35 mm,
- clé électronique partiellement chromée (équivalente à une miroir) 14 mm de hauteur et 64 mm de long,
- trousseau de clés de maison.

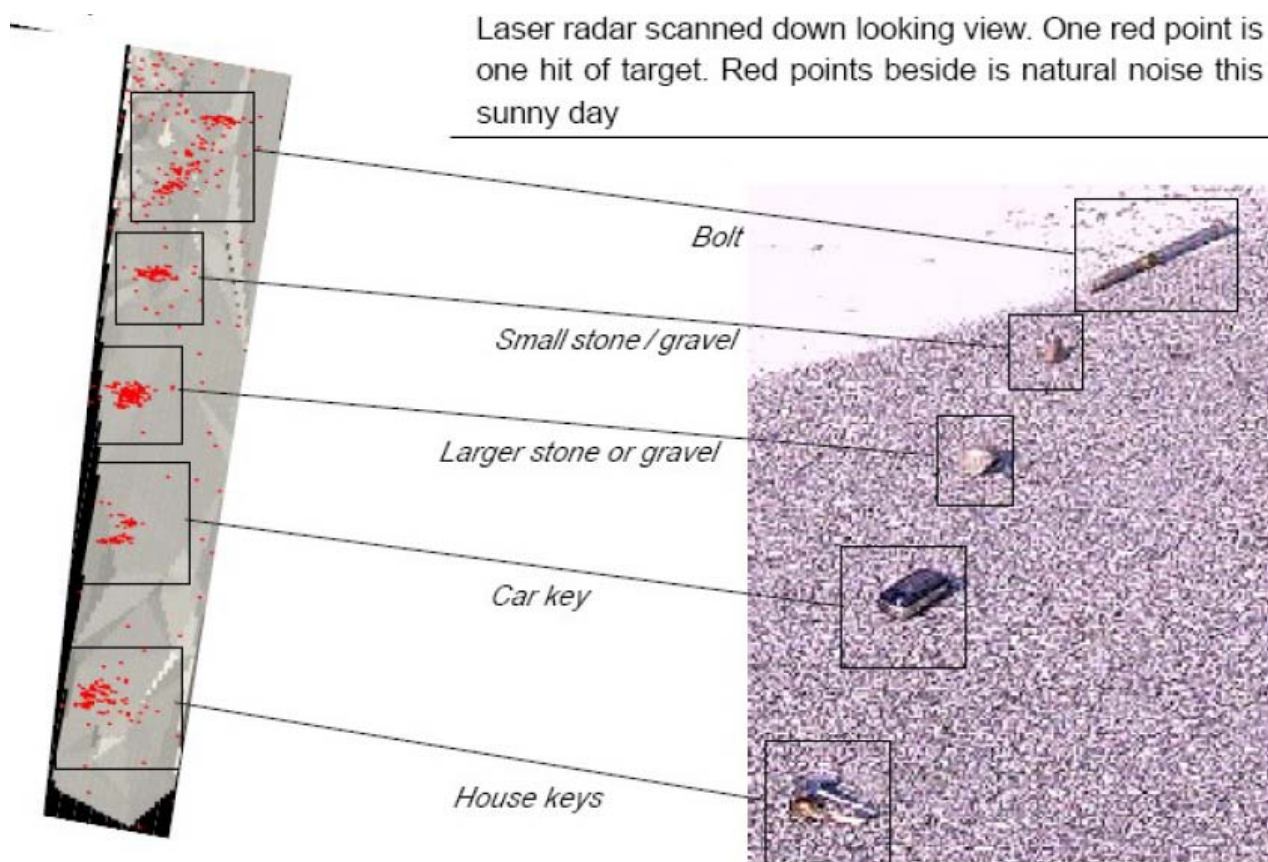


Figure 71 : Images de divers objets données par le détecteur

2 Analyse du système

2.1 Eléments sur les choix techniques

2.1.1 Eléments sur le détecteur

Le choix d'un détecteur de type laser permet une grande finesse de détection. Cependant, cette finesse diminue fortement avec la distance de détection et le détecteur reste sensible à certains phénomènes extrinsèques tels que la neige et les turbulences atmosphériques (notamment celles provoquées par les aéronefs).

Le système présente l'intérêt de pouvoir reconstituer la forme d'un objet et disposer ainsi d'une possibilité de classification. Par ailleurs, la finesse de la détection peut permettre un seuil de détection particulièrement bas.

2.1.2 Eléments sur l'architecture du système

L'architecture paraît complexe avec un ordinateur dédié au traitement par unité de détection. Un nombre de 10 détecteurs apparaît être un minimum pour une piste de 3 000 mètres, ce qui fait autant d'unités informatiques à installer et autant de sources de panne.

Le fabricant prévoit que ce système soit utilisé en complément d'un système de détection déjà existant, ce système servant de méthode de confirmation.

Le fabricant indique un positionnement des détecteurs plus concentré aux seuils de piste en indiquant que ces zones sont les plus critiques pendant les phases de décollage et d'atterrissage. Cette analyse n'apparaît pas toujours conforme à la réalité. En effet, s'il est vrai que le risque lié à une collision avec un objet étranger, apparaît d'autant plus grand que la vitesse de l'aéronef est élevée, les points de décollage ne sont pas toujours situés au niveau des seuils. Ainsi, pour une même piste, certains aéronefs pourront atteindre leur vitesse de rotation, bien avant le seuil opposé de la piste. Dès lors, il apparaît nécessaire que la totalité de la piste soit surveillée par les systèmes de détection avec la même précision.

2.2 Réponse aux exigences

Ainsi que cela a déjà été souligné, le système est en cours de développement, aussi, certains composants sont en cours de définition et il n'est pas possible d'émettre un avis à ce stade.

2.2.1 Réponse aux exigences fonctionnelles

2.2.1.1 Fonction de détection et d'alerte automatique

Le système est prévu pour assurer une détection des objets étrangers continue et sans perturbation directe du trafic. L'opérateur devrait être automatiquement informé de la détection d'un objet par le système.

2.2.1.2 Fonction de localisation

Le système de LaserOptronix permet la localisation des objets avec une précision de l'ordre du centimètre. Cette précision est sans doute trop élevée par rapport aux méthodes de repérage (GPS notamment) que peuvent utiliser les agents chargés de la collecte de l'objet.

2.2.1.3 Fonction de confirmation

Le système n'est pas doté d'un système de confirmation permettant de lever les éventuelles fausses alarmes. La mise à disposition possible d'une information sur la forme de l'objet (le système est capable de reproduire en trois dimensions la forme de l'objet détecté) n'apparaît pas être une fonction de confirmation, telle qu'elle a été définie.

Néanmoins, le fabricant étudie la possibilité d'utiliser son système en complément d'un autre système de détection.

2.2.1.4 Fonction d'identification

Bien qu'elle ne soit pas encore prévue à ce stade du développement, une procédure de classification peut être faite à partir de l'élaboration d'une base de données de cibles dont on connaît les signatures (qui dépendent du capteur). Les signatures des images mesurées sur les objets étrangers sont ensuite comparées à celles des cibles de la base.

Le système étant en mesure de reproduire les formes, des informations sur la taille et la forme de l'objet peut être transmise à l'opérateur afin de l'aider dans sa décision du moment le plus propice pour procéder à la collecte de l'objet étranger détecté.

2.2.2 Réponse aux exigences opérationnelles

2.2.2.1 Période de détection

Le système assure une détection permanente (hors période de maintenance et pannes).

2.2.2.2 Compatibilité aéroportuaire

Ce point est traité dans le titre 2.3.

2.2.2.3 Conditions de fonctionnement

Le système est conçu pour fonctionner de jour comme de nuit, dans toutes les conditions météorologiques. Néanmoins, des réductions de performances sont possibles (voir paragraphe suivant sur les exigences de performances).

2.2.3 Réponse aux exigences de performances

2.2.3.1 Caractéristiques des objets étrangers détectés

Le seuil de détection annoncé est particulièrement intéressant : 10 à 20 mm. Néanmoins, cette performance est atténuée en fonction de la distance d'implantation du détecteur. Une installation à proximité de la piste est essentielle pour assurer un seuil de détection satisfaisant.

Le système semble en mesure de détecter toute sorte d'objet (indépendamment de la couleur, de la matière et de la forme) comme l'attestent les tests réalisés [38]. Le fabricant précise cependant que le système peut présenter un risque de non détection des objets présentant des surfaces réfléchissantes (type miroir).

La précision de la détection est assurée quelles que soient les conditions de luminosité. Néanmoins, en fonction des conditions météorologiques, la détection peut être moins précise. Les tests réalisés par le fabricant n'ont pas porté sur l'analyse des pertes en cas de pluie, de neige ou de brouillard. On peut supposer une diminution significative de la performance dans ces conditions.

Par ailleurs, le fabricant souligne la sensibilité du système aux turbulences atmosphériques [39], notamment celles générées par les avions. Ce point est particulièrement important et peut nuire de manière sensible à la précision de la détection.

Le système est également perturbé par la neige qui peut atténuer ses performances.

2.2.3.2 Caractéristiques des animaux détectés

Le fabricant a précisé au cours des échanges qu'il prévoyait l'utilisation de son système dans le cadre de la lutte contre le péril animalier. Cependant, on peut noter que le système ne pourra pas détecter les animaux noyés dans la végétation. Par ailleurs, compte tenu de l'inclinaison du détecteur, il apparaît difficile de pouvoir détecter les oiseaux en vol (le détecteur est orienté vers le sol).

2.2.4 Réponse sur la zone de détection

Le système assure une détection efficace sur les surfaces revêtues de la chaussée, c'est à dire la piste, et les accotements s'ils sont revêtus.

Par contre, le système n'est pas en mesure de détecter des objets qui seraient noyés dans la végétation. Ainsi, une détection dans la bande de piste n'apparaît pas pertinente avec ce système.

2.2.5 Réponse sur le temps de détection

Le temps de détection n'a pas été mesuré exactement dans la mesure où le système d'exploitation du détecteur n'est pas encore développé (les informations du détecteur sont encore traitées manuellement). Néanmoins, le temps de détection sera vraisemblablement de l'ordre de quelques minutes (temps pris par le détecteur pour couvrir son secteur). L'augmentation du nombre de détecteurs, ainsi que l'amélioration des performances du détecteur (en modifiant notamment la puissance émise) pourrait permettre de faire baisser ce temps de détection.

2.3 Eléments sur la compatibilité aéroportuaire

2.3.1 Compatibilité avec les contraintes d'implantation

Ainsi que mentionné précédemment, la qualité de la détection dépend fortement de la distance d'implantation du système. Dès lors, soit il est choisi d'installer le détecteur dans la bande de piste (le détecteur a une hauteur de 60 cm avec une masse de 12 kg, une bague de rupture est prévue), soit il est choisi de l'installer à l'extérieure de la bande et sous les dégagements, c'est à dire à une distance de 154 mètres de l'axe de la piste (piste de chiffre de code 3 ou 4) et son seuil de détection est supérieur à 2 cm.

Par ailleurs, de par la surface couverte, un nombre important de détecteurs doit être installé (environ 10 pour une piste de 3000 mètres). Aussi des difficultés sont à craindre pour les pistes dotées d'un nombre important d'entrées/sorties de piste.

Par contre, de par sa hauteur, le système permet une implantation proche de la bande de piste qui ne devrait pas poser de difficultés majeures lorsque la piste est dotée d'une voie de circulation parallèle.

2.3.2 Compatibilité avec les équipements aéronautiques

Le système fonctionne dans des longueurs d'onde et avec une puissance émise qui n'a pas d'impact sur les aides radioélectriques. En conséquence, le système n'a pas d'impact, à ce stade de son développement, sur le fonctionnement des équipements radioélectriques fonctionnant sur l'aérodrome.

Le système utilisant une diode laser infrarouge, il ne perturbera pas les aides visuelles de la piste.

2.3.3 Compatibilité avec l'exploitation de l'aérodrome

2.3.3.1 Impact sur les personnes et les aéronefs

La longueur d'onde utilisée par le système, ainsi que l'énergie transmise n'ont pas d'impact sur la santé et la vision des personnes. Aucune information n'est fournie concernant l'impact sur les aéronefs, cependant, compte tenu des émissions dans le domaine de l'infrarouge, le système ne devrait pas avoir d'impact sur ceux-ci. Une attention est à apporter sur la puissance de la diode laser qu'il peut être choisi d'augmenter afin d'améliorer la portée et la sensibilité. Dans tous les cas une analyse sur l'impact sur la santé humaine est à faire.

2.3.3.2 Impact sur la capacité

Le système offre une détection permanente de la piste sans nécessiter l'arrêt des opérations. Dès lors, le système n'a pas d'impact sur l'exploitation de la piste.

Le système étant en développement, le taux de fausses alarmes n'est pas disponible.

2.3.3.3 Exploitation du système

Le fabricant n'a pas fourni d'informations relatives aux procédures d'exploitation de son système, sur la gestion des situations où la qualité de la détection est faible.

Cependant, les procédures proposées par d'autres systèmes demeurent très génériques et peuvent être éventuellement appliquées au système LaserOptronix.

Le système étant en développement et l'utilisation des détecteurs en réseau n'étant pas encore finalisée, aucune procédure de gestion des situations dégradées n'est disponible.

3 Conclusions

Le système en cours de développement par LaserOptronix présente une possibilité de détection intéressante, notamment avec un seuil de détection qui peut aller jusqu'à 1 cm (à une distance de détection de 100 mètres actuellement). Le système est en mesure de reconstituer en trois dimensions les objets détectés ce qui représente une capacité intéressante, notamment pour assurer la fonction d'identification.

La sensibilité du détecteur aux conditions météorologiques et aux turbulences est à analyser avec attention de manière à identifier clairement les conditions dans lesquelles le système fournit une information fiable.

Par ailleurs, le système peut nécessiter d'être implanté dans la bande de piste pour apporter des performances satisfaisantes ce qui peut poser des difficultés de respect des normes en vigueur. De plus, le nombre important de détecteurs rend difficile le respect des inter distances entre les différents détecteurs lorsque le nombre d'entrées/sorties de piste est élevé.

Par ailleurs, les détecteurs LIDAR utilisent des diodes qui ont une durée de vie limitée. L'exploitant annonce un temps moyen avant panne de 20 000 heures (ce qui représente une durée d'un peu plus de deux années avec un fonctionnement permanent des détecteurs). Le coût de maintenance non mentionné est susceptible d'être élevé. La durée de vie du système est de 10 années.

Le système ne peut pas actuellement être retenu comme utilisable sur les aérodromes. Néanmoins, il offre des possibilités intéressantes et son développement mérite d'être suivi attentivement.

Ressources, territoires, habitats et logement
Énergies et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**

service technique de l'Aviation civile
31, avenue du Maréchal Leclerc
94381 BONNEUIL-SUR-MARNE CEDEX
Tél. 33 (0) 1 49 56 80 00
Fax 33 (0) 1 49 56 82 19

Site de Toulouse
9, avenue du Docteur Maurice Grynfolgel - BP 53735
31037 TOULOUSE CEDEX
Tél. 33 (0) 1 49 56 83 00
Fax 33 (0) 1 49 56 83 02

Centre de test de détection d'explosifs
Centre d'essais de lancement de missiles - BP 38
40602 BISCARROSSE CEDEX
Tél. 33 (0) 5 58 83 01 73
Fax 33 (0) 5 58 78 02 02