

Annexe A

Les mines antipersonnel

Les mines antipersonnel sont réparties en quatre sous-catégories selon la façon d'infliger les blessures. Plus de 360 modèles ont été créés.

1. Les mines à effet de souffle

Elles sont principalement conçues pour amputer les membres inférieures des victimes. Le déclenchement se fait par pression directe sur la mine (comprise entre 1 et 7 kg). Elles ont une action locale.

2. Les mines à fragmentation

Elles sont conçues pour tuer ou blesser une ou plusieurs personnes. Le déclenchement se fait par pression ou par traction du ou des fils pièges. Les fragments métalliques provenant de l'enveloppe de la mine sont projetés selon un angle de 360°, provoquant la mort dans un rayon de 4 m et de graves blessures bien au-delà.

3. Les mines bondissantes

Lorsque la mine est déclenchée, une première charge explosive soulève la mine à environ 1.50 m du sol, puis la charge principale explose. Les billes ou les éclats métalliques contenus dans la mine sont alors projetés dans un rayon minimum de 25 m et selon un angle de 360°, provoquant la mort jusqu'à 35 m ou plus, et de graves blessures au-delà de 100 m.

4. Les mines à effet dirigé

Les billes ou les éclats métalliques contenus dans la mine sont projetés selon un angle horizontal de 60° et sur 2 m de hauteur, provoquant des lésions graves, voire mortelles, jusqu'à une distance de 50 m.

Les photographies de plusieurs mines antipersonnel appartenant à ces catégories sont représentées sur la figure A.1.



FIG. A.1: Les différentes sous-catégories de mines antipersonnel. Les photos des mines sont issues de [Mas04].

La figure A.2 indique la répartition des mines antipersonnel dans le monde ainsi que les pays ayant signés ou non la Convention sur l'interdiction des mines.

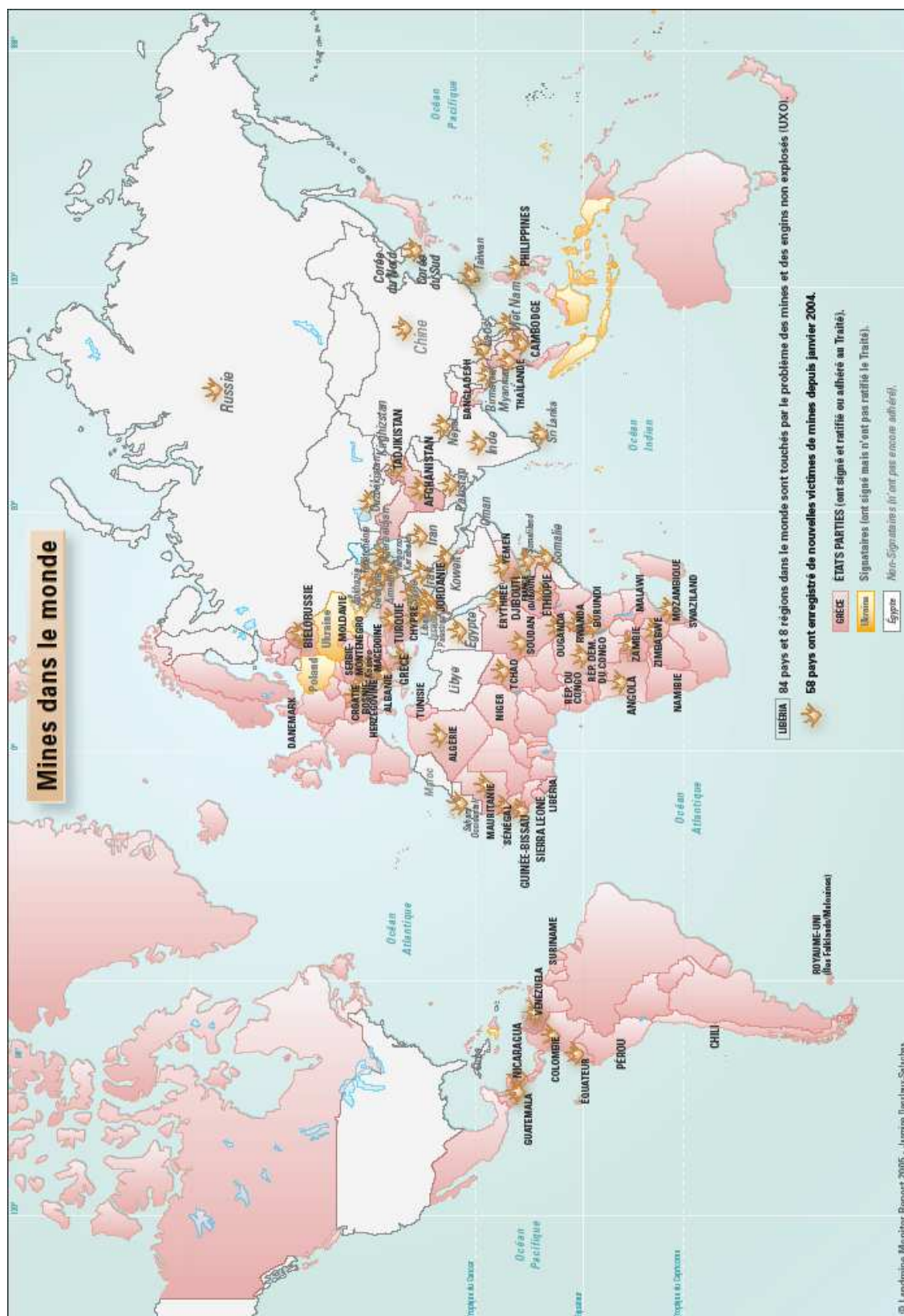


FIG. A.2: Répartition des mines dans le monde. Cette carte est issue de [Des05]

Annexe B

Données MACADAM

Le projet MACADAM, à l'initiative de la Commission Européenne, a permis de créer une base de données multicateurs, afin de soutenir le programme européen de recherche et développement sur le déminage humanitaire, voir [Dea01a]. L'enregistrement des données MACADAM a été réalisé par THALES, au Joint Research Centre de la Commission Européenne à Ispra en Italie, du 17 Août au 11 Septembre 1998. Le système multicateur utilisé comporte quatre capteurs : un GPR, une caméra infrarouge, un détecteur de métal et un radiomètre. Ces capteurs ont été utilisés au dessus de différents types de sol dans lesquels plusieurs mines antipersonnel ont été enfouies. La figure B.1 montre un des scénarios d'essais pour l'enregistrement des données MACADAM. Ces dernières sont la propriété de la Commission Européenne.



FIG. B.1: Scenario d'essais pour l'enregistrement des données MACADAM. Plusieurs mines antipersonnel ont été enfouies à différentes profondeurs dans un sol constitué de terre.

Le travail de cette thèse portant sur l'analyse et le traitement des données GPR, seules les principales caractéristiques de ce radar sont décrites dans le paragraphe suivant. Des informations relatives aux autres capteurs peuvent être trouvées dans [Dea01a].

B.1 Caractéristiques du GPR

Le GPR est un modèle standard Mk1 SPRscan, développé par ERA Technology, avec un logiciel spécifique de THALES permettant l'acquisition d'un Ascan à chaque position du radar. Celui-ci possède deux antennes dipolaires dont l'une est émettrice et l'autre réceptrice. Le radar émet, à une fréquence de 1 MHz, un court pulse électromagnétique. La fréquence centrale du pulse est de 1 GHz et la puissance du pic de 17 W. Pour chaque mesure, 10 échantillons analogiques sont moyennés puis numérisés par un convertisseur 16 bits analogique/numérique fonctionnant à 100 KHz. La période d'échantillonnage est de 50 ps et chaque Ascan contient jusqu'à 256 échantillons.

B.2 Description des mines antipersonnel

Quatre types de mines antipersonnel réelles ont été utilisés dans les différents scénarios d'essais de la campagne MACADAM : les mines Tecnovar-MAUS1, Valsella VSMK2, Tecnovar AUPS et Tecnovar VAR40. La figure B.2 présente une photographie de chacune de ces mines. Les principales caractéristiques des ces quatre mines antipersonnel sont données dans le tableau B.1.

TAB. B.1: Caractéristiques des mines antipersonnel [Jan97]

Nom	Forme	Taille (mm)	Explosif	Boîtier	contenu métallique
MAUS1	Cylindre plat	$\phi = 89$ $h = 46$	T4	Plastique, acier et néoprène	Grand
VSMK2	Cylindre plat	$\phi = 90$ $h = 32$	RDX/Wax	Plastique	Faible
AUPS	Cylindre plat	$\phi = 102$ $h = 36$	Composition B	Plastique ou Bakélite	Très faible
VAR40	Cylindre plat	$\phi = 78$ $h = 45$	T4	Résine	Presque nul

L'analyse de ce tableau montre que ces quatre mines ont la même forme et approximativement la même taille. Cependant, le contenu métallique de ces mines n'est pas le même. De ce fait, elles ne sont pas détectées de la même façon par les différents capteurs. Par exemple, les mines AUPS et VAR40, dont le contenu métallique est très faible, sont difficilement détectables par un capteur tel que le détecteur de métal à l'inverse des mines MAUS1. Concernant le GPR, Thalès à réaliser des mesures à l'aide d'un GPR portable, afin d'estimer les distances pour lesquelles ce radar est capable de détecter chacune des quatre mines. Les résultats sont donnés dans le tableau B.2.



FIG. B.2: Photographies des mines antipersonnel Tecnovar-MAUS1 (en haut à gauche), Valsella VSMK2 (en haut à droite), Tecnovar AUPS (en bas à gauche) et Tecnovar VAR40 (en bas à droite). Les photographies sont issues de [Dea01b].

TAB. B.2: Détectabilité des mines antipersonnel par un GPR [Dea01a]

Nom	Distance GPR - mine
MAUS1	0 - 30 cm
VSMK2	0 - 15 cm
AUPS	0 - 10 cm
VAR40	0 - 2 cm

Ainsi, le GPR est capable de détecter les quatre types de mines antipersonnel contrairement au détecteur de métal. Cependant, en ce qui concerne les mines de type VAR40 dites "mines plastiques", seules les mines posées sur le sol ou affleurantes pourront être détectées par le GPR. Outre le contenu métallique des mines, pour avoir une bonne détectabilité des mines, il faut que le contraste de permittivité diélectrique entre le sol et ces mines soit suffisamment élevé.

B.3 Description des scénarios d'essais

Vingt scénarios distincts ont été définis par Thalès. La zone d'essais se situe à l'intérieur d'une bande rectangulaire de 29 mètres de long sur 6 mètres de large. L'Aire d'essais contient trois zones principales :

- une zone de 12 m \times 6 m de sol agricole propre.
- une zone de 8 m \times 6 m de sol sableux propre.
- une zone de 9 m \times 6 m de terrain existant sur place.

Un sol est qualifié de "propre" lorsqu'il ne contient pas de fausses cibles, quelles soient naturelles ou non. Des mesures ont pu établir que le terrain existant comportait environ une fausse cible par mètre carré. La disposition des différents scénarios, le long de la ligne de mesure, est représentée sur la figure B.3.

Les mesures sont effectuées à l'aide d'un système portable multicateur de Thalès. Celles-ci sont réalisées à l'aide d'un banc de mesure afin d'obtenir des données parfaitement enregistrées. Ce banc permet de sonder pour chaque scénario une aire de terrain de 1 m \times 1.5 m, avec un pas de 2 cm dans les deux directions. Ainsi, pour chaque scénario on obtient un total de 3750 Ascans ($N_x = 50 \times N_y = 75$).

Parmi les vingt scénarios existant, 10 scénarios ont été retenus en vue des différentes simulations nécessitant des données réelles. (Les scénarios ne comportant pas de mines antipersonnel ont été écartés.) Les scénarios sélectionnés sont tels que pour chacun d'entre eux, plusieurs mines antipersonnel ont été enfouies à différentes profondeurs. D'un scénario à l'autre, la nature du terrain ainsi que celles des mines changent. Les différents scénarios sont décrits sur la figure B.4. Pour les scénarios 2, 3 et 4 le sol est constitué d'une terre agricole propre dans laquelle des mines de type MAUS1, VSMK2 et

Scénario #2		Scénario #3		Scénario #4	
Terre agricole		Terre agricole		Terre agricole	
MAUS1 enfouie à 5 cm	MAUS1 posée	VSMK2 enfouie à 5 cm	VSMK2 posée	AUPS posée	AUPS affleurante
MAUS1 enfouie à 10 cm	MAUS1 affleurante	VSMK2 enfouie à 10 cm	VSMK2 affleurante	VSMK2 enfouie à 5 cm	VSMK2 enfouie à 5 cm
AUPS enfouie à 1 cm	MAUS1 enfouie à 1 cm	AUPS enfouie à 5 cm	VSMK2 enfouie à 1 cm	MAUS1 enfouie à 10 cm	MAUS1 enfouie à 10 cm
Scénario #7		Scénario #8		Scénario #9	
Sable		Sable		Sable	
MAUS1 enfouie à 5 cm	MAUS1 posée	VSMK2 enfouie à 5 cm	VSMK2 posée	VAR40 posée	VAR40 affleurante
MAUS1 enfouie à 10 cm	MAUS1 affleurante	VSMK2 enfouie à 10 cm	VSMK2 affleurante	VAR40 enfouie à 5 cm	VAR40 enfouie à 5 cm
AUPS enfouie à 1 cm	MAUS1 enfouie à 1 cm	AUPS enfouie à 5 cm	VSMK2 enfouie à 1 cm	VAR40 posée et camouflée	VAR40 enfouie à 10 cm
Scénario #11		Scénario #12		Scénario #13	
Terrain existant		Terrain existant		Terrain existant	
MAUS1 enfouie à 5 cm	MAUS1 posée	VSMK2 enfouie à 5 cm	VSMK2 posée	AUPS enfouie à 5 cm	AUPS posée
MAUS1 enfouie à 10 cm	MAUS1 affleurante	VSMK2 enfouie à 10 cm	VSMK2 affleurante	AUPS enfouie à 10 cm	AUPS affleurante
AUPS enfouie à 1 cm	MAUS1 enfouie à 1 cm	AUPS enfouie à 5 cm	VSMK2 enfouie à 1 cm	AUPS posée et camouflée	AUPS enfouie à 1 cm
Scénario #17					
Sable de Mozambique					
Métal enfouie à 1 cm		Métal enfouie à 5 cm			
VSMK2 Affleurante et camouflée					
Métal enfouie à 5 cm		Métal enfouie à 2 cm			
VSMK2 enfouie à 2 cm					
Métal affleurant		Métal enfouie à 1 cm			

FIG. B.4: Configuration des différents scénarios. Pour chaque scénario, la configuration de pose des mines, le type de mines ainsi que la nature du terrain sont donnés.

Annexe C

Résultats de simulations

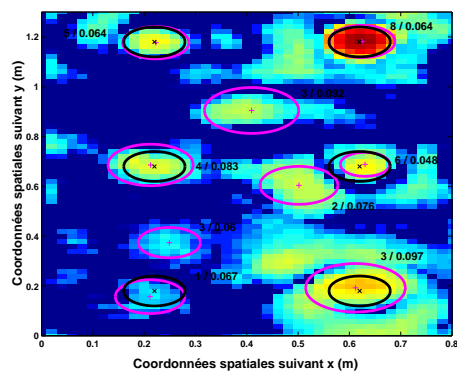


FIG. C.1: Superposition de l'image de détection et du Cscan résultant de l'étape 1, pour les données Cscan du scénario 2. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.

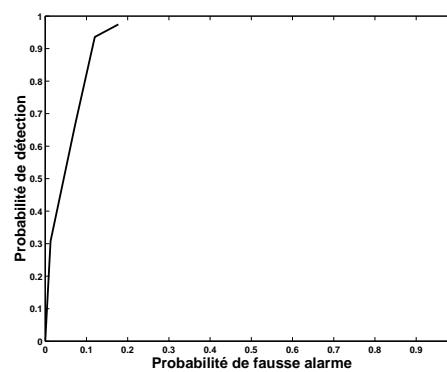


FIG. C.2: Courbe COR pour le scénario 2.

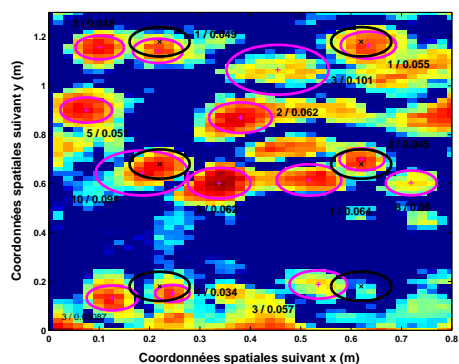


FIG. C.3: Superposition de l'image de détection et du Cscan résultant de l'étape 1, pour les données Cscan du scénario 3. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.

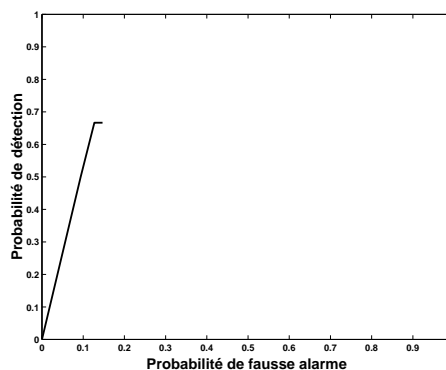


FIG. C.4: Courbe COR pour le scénario 3.

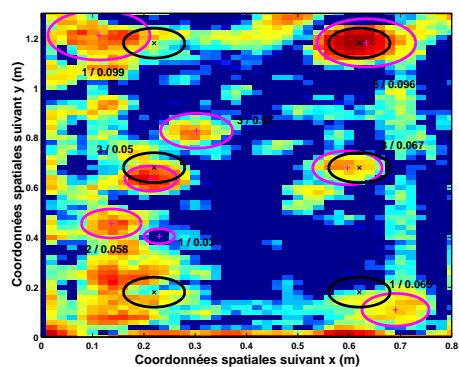


FIG. C.5: Superposition de l'image de détection et du Cscan résultant de l'étape 1, pour les données Cscan du scénario 8. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.

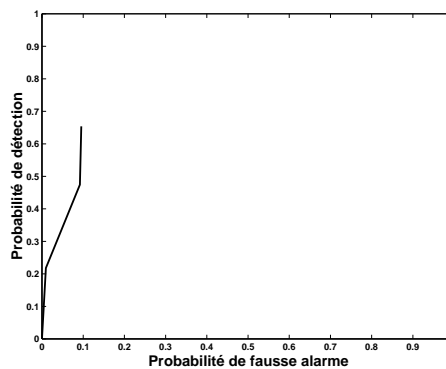


FIG. C.6: Courbe COR pour le scénario 8.

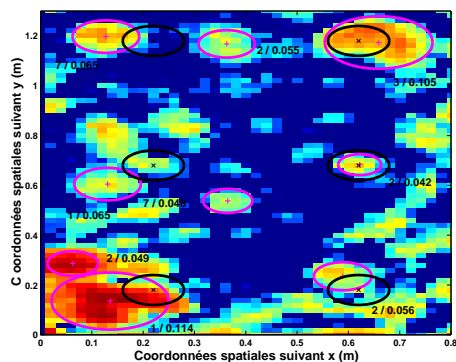


FIG. C.7: Superposition de l'image de détection et du Cscan résultant de l'étape 1, pour les données Cscan du scénario 9. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.

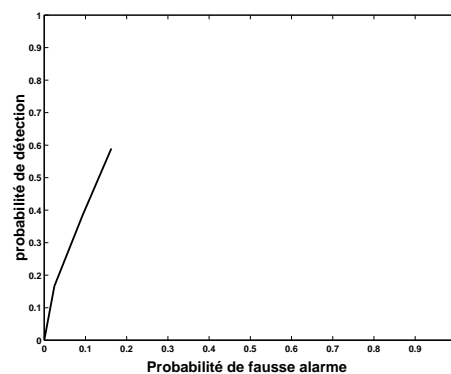


FIG. C.8: Courbe COR pour le scénario 9.

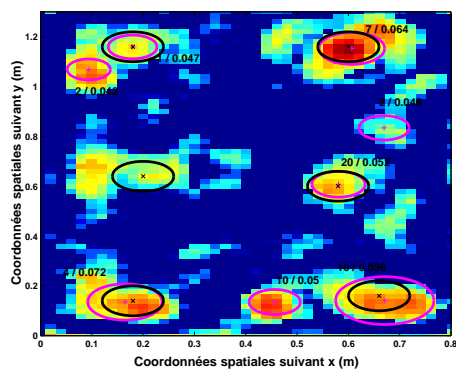


FIG. C.9: Superposition de l'image de détection et du Cscan résultant de l'étape 1, pour les données Cscan du scénario 12. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.

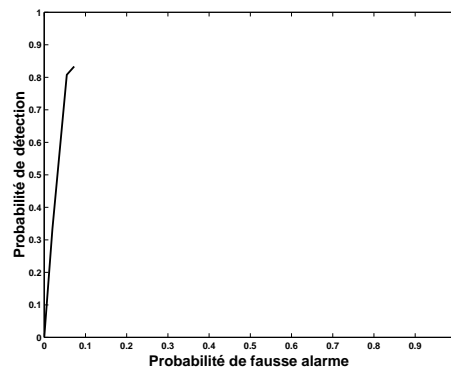


FIG. C.10: Courbe COR pour le scénario 12.

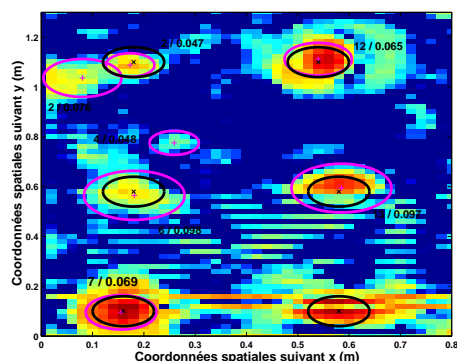


FIG. C.11: Superposition de l'image de détection et du Cscan résultant de l'étape 1, pour les données Cscan du scénario 13. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.

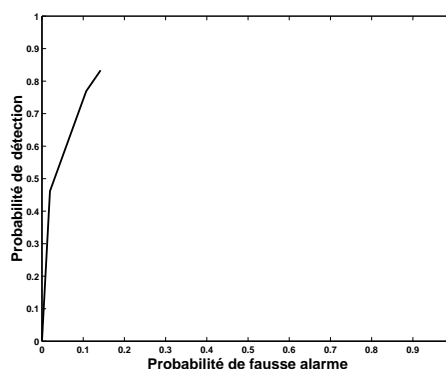


FIG. C.12: Courbe COR pour le scénario 13.

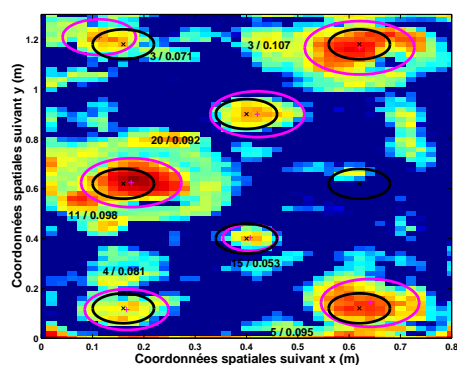


FIG. C.13: Superposition de l'image de détection et du Cscan résultant de l'étape 1, pour les données Cscan du scénario 17. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.

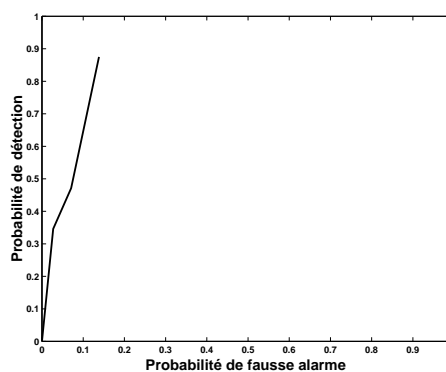


FIG. C.14: Courbe COR pour le scénario 17.

Annexe D

Rappels méthodologiques

D.1 Décomposition en valeurs singulières

Théorème D.1.1 *Pour toute matrice $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{m \times n}$ il existe deux matrices unitaires $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1 \cdots \mathbf{u}_m] \in \mathbb{C}^{m \times m}$ et $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1 \cdots \mathbf{v}_n] \in \mathbb{C}^{n \times n}$ pour lesquelles on a :*

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H = \sum_{i=1}^p \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^H \quad (\text{D.1})$$

où H dénote l'opérateur Hermitien et $\mathbf{\Sigma}$ la matrice pseudo-diagonale de taille $m \times n$ de structure suivante :

$$\mathbf{\Sigma} = \begin{pmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (\text{D.2})$$

avec $\mathbf{D} = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_p)$ une matrice diagonale de taille $p \times p$ et $\sigma_i, i = 1 \cdots p$, les nombres positifs réels ordonnés tels que $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_p > 0$. Les éléments $\sigma_i, i = 1 \cdots p$, sont dénommés valeurs singulières. Les vecteurs $\mathbf{u}_i, i = 1 \cdots p$, sont appelés vecteurs singuliers gauches et les vecteurs $\mathbf{v}_i, i = 1 \cdots p$, sont appelés vecteurs singuliers droits.

Soit \mathbf{A} une matrice décomposée en valeurs singulières d'après la relation (D.1). Notons que $\mathbf{A}^H = \mathbf{V}\mathbf{\Sigma}^H\mathbf{U}^H$, $\mathbf{U}^H\mathbf{U} = \mathbf{I}$ et $\mathbf{V}^H\mathbf{V} = \mathbf{I}$, il vient :

$$\mathbf{A}^H\mathbf{A} = \mathbf{V}(\mathbf{\Sigma}^H\mathbf{\Sigma})\mathbf{V}^H, \quad \mathbf{A}\mathbf{A}^H = \mathbf{U}(\mathbf{\Sigma}\mathbf{\Sigma}^H)\mathbf{U}^H \quad (\text{D.3})$$

et

$$\mathbf{A}^H\mathbf{A}\mathbf{v}_i = \sigma_i^2\mathbf{v}_i, \quad \mathbf{A}\mathbf{A}^H\mathbf{u}_i = \sigma_i^2\mathbf{u}_i, \quad \text{pour } i = 1 \cdots p \quad (\text{D.4})$$

Ainsi, une matrice \mathbf{A} décomposée en valeurs singulières admet les propriétés suivantes :

- Les colonnes de \mathbf{U} sont les vecteurs propres de la matrice Hermitienne $\mathbf{A}\mathbf{A}^H$ de taille $m \times m$.

- Les colonnes de \mathbf{V} sont les vecteurs propres de la matrice Hermitienne $\mathbf{A}^H \mathbf{A}$ de taille $n \times n$.
- Les matrices $\mathbf{A} \mathbf{A}^H$ et $\mathbf{A}^H \mathbf{A}$ possèdent les mêmes valeurs propres $\sigma_i^2, i = 1 \dots p$. Par conséquent, les valeurs singulières de \mathbf{A} sont les racines carrées positives des valeurs propres non nulles des matrices $\mathbf{A} \mathbf{A}^H$ et $\mathbf{A}^H \mathbf{A}$.
- Le rang de la matrice \mathbf{A} est égal au nombre de valeurs singulières non nulles de \mathbf{A} . Ainsi, $\text{rang}(\mathbf{A})=p$.
- Le produit extérieur $\mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^H, i = 1 \dots p$, est une matrice de rang 1.

La décomposition en valeurs singulières de la matrice \mathbf{A} revient à décomposer \mathbf{A} en une somme pondérée (par les valeurs singulières σ_i) de matrices de rang 1 orthogonales entre elles.

D.2 La transformée bilinéaire

La transformée bilinéaire, définie dans [OS75], permet de passer d'une fonction de transfert $H_a(s)$ d'un filtre analogique à la fonction de transfert $H_n(z)$ d'un filtre numérique. La transformation bilinéaire établit une bijection entre la partie du plan complexe en s telle que $\text{Re}(s) < 0$ et la partie du plan complexe en z telle que $|z| < 1$, elle est définie par la relation suivante :

$$H_n(z) = H_a\left(s = \frac{2}{T_s} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}\right) \quad (\text{D.5})$$

avec z un nombre complexe tel que $z = e^{j\omega}$ où $\omega = \frac{2\pi f_n}{f_s}$ dénote la pulsation numérique réduite, f_n la fréquence numérique et $f_s = \frac{1}{T_s}$ la fréquence d'échantillonnage.

L'amplitude de la réponse fréquentielle est inchangée par transformation bilinéaire. Seules les fréquences changent, la pulsation numérique ω et la pulsation analogique Ω sont liées par la relation non linéaire suivante :

$$\omega = 2 \arctan\left(\frac{\Omega T_s}{2}\right) \quad (\text{D.6})$$

De même, la fréquence numérique f_n et la fréquence analogique f_a sont liées par la relation suivante :

$$f_n = \frac{f_s}{\pi} \arctan\left(\frac{\pi f_a}{f_s}\right) \quad (\text{D.7})$$

Grâce à cette relation on peut passer directement de la réponse en fréquence d'un filtre analogique à la réponse en fréquence d'un filtre numérique.

Le gabarit du filtre numérique adapté aux données Bscan peut donc être obtenu en utilisant la relation (D.7).

D.3 La transformée de Fourier d'une ellipse

La réponse fréquentielle d'une ellipse, dénotée $I_s(\nu_x, \nu_y)$ s'écrit :

$$I_s(\nu_x, \nu_y) = \int_0^a \int_0^{2\pi} e^{-2i\pi\nu_x(r \cos(\theta)+x_0)} e^{-2i\pi\nu_y(\frac{b}{a}r \sin(\theta)+y_0)} r dr d\theta \quad (\text{D.8})$$

Le changement de coordonnées suivant est ensuite effectué :

$$\begin{cases} \nu_x &= k_r \cos(k_\theta) \\ (\frac{b}{a})\nu_y &= k_r \sin(k_\theta) \end{cases} \quad (\text{D.9})$$

Il vient :

$$\begin{aligned} I_s(k_r, k_\theta) &= e^{-2i\pi k_r(\cos(k_\theta)x_0 + \frac{a}{b} \sin(k_\theta)y_0)} \int_0^a \int_0^{2\pi} e^{-2i\pi k_r r(\cos(\theta) \cos(k_\theta) + \sin(\theta) \sin(k_\theta))} r dr d\theta \\ &= e^{-2i\pi k_r(\cos(k_\theta)x_0 + \frac{a}{b} \sin(k_\theta)y_0)} \int_0^a \int_0^{2\pi} e^{-2i\pi k_r r(\cos(\theta-k_\theta))} r dr d\theta \\ &= e^{-2i\pi k_r(\cos(k_\theta)x_0 + \frac{a}{b} \sin(k_\theta)y_0)} \int_0^a \int_{-k_\theta}^{2\pi-k_\theta} e^{-2i\pi k_r r(\cos(\alpha))} r dr d\alpha \\ &= e^{-2i\pi k_r(\cos(k_\theta)x_0 + \frac{a}{b} \sin(k_\theta)y_0)} \int_0^a \left[\int_0^{2\pi} e^{-2i\pi k_r r(\cos(\alpha))} d\alpha \right] r dr \end{aligned} \quad (\text{D.10})$$

Soit $J_0(z)$ la fonction de Bessel de première espèce d'ordre zéro définie par :

$$J_0(z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{iz \cos(\alpha)} d\alpha \quad (\text{D.11})$$

On note que cette fonction est telle que : $J_0(z) = J_0(-z)$. La réponse fréquentielle d'une ellipse s'écrit alors :

$$I_s(k_r) = e^{-2i\pi k_r(\cos(k_\theta)x_0 + \frac{a}{b} \sin(k_\theta)y_0)} \left[2\pi \int_0^a J_0(2\pi k_r r) r dr \right] \quad (\text{D.12})$$

La propriété suivante est utilisée par la suite :

$$\int_0^u v J_0(v) dv = u J_1(u) \quad (\text{D.13})$$

Soit $v = 2\pi k_r r$ et $dv = 2\pi k_r dr$, l'amplitude du spectre d'une ellipse s'écrit finalement :

$$|I_s(k_r)| = \frac{a}{k_r} |J_1(2\pi k_r a)| \quad (\text{D.14})$$

avec $k_r = \sqrt{\nu_x^2 + (\frac{b}{a})^2 \nu_y^2}$ et $J_1(z)$ la fonction de Bessel de première espèce d'ordre 1 définie par :

$$J_1(z) = \frac{1}{2i\pi} \int_0^{2\pi} e^{iz \cos(\alpha)} \cos(\alpha) d\alpha \quad (\text{D.15})$$

Liste des tableaux

1.1	Récapitulatif des méthodes de réduction de clutter pour les données Bscan	33
1.2	Equations du filtre Kalman sous l'hypothèse H_0 et sous l'hypothèse H_1	41
2.1	Différents types de fenêtre et leurs caractéristiques	55
2.2	Paramètres de simulation	58
2.3	Paramètres de simulation	59
2.4	R_c , R_s et R_b pour les différents filtres.	63
2.5	Paramètres de simulation	76
2.6	R_c et R_m pour les différents filtres.	80
3.1	Paramètres de simulation	107
3.2	Paramètres de simulation	110
3.3	Paramètres de la méthode pour le Bscan de la figure 3.15	111
3.4	Paramètres de la méthode pour les données Bscans réelles.	113
4.1	Taux de détection et de fausse alarme pour les scénarios 4 et 11.	133
5.1	Taux de détection pour différents scénarios de la campagne MACADAM.	137
5.2	Taux de détection pour les mines présentes dans les 10 scénarios sélectionnés.	138
5.3	Taux de détection des mines en fonction du type de sol.	138
5.4	Taux de détection des mines en fonction de la configuration de pose.	138
5.5	Taux de détection et de fausse alarme pour différents scénarios.	149
5.6	Taux de détection pour les mines présentes dans les 10 scénarios sélectionnés.	149
5.7	Taux de détection des mines en fonction du type de sol.	149
5.8	Taux de détection des mines en fonction de la configuration de pose.	149
5.9	Taux de détection pour les mines présentes dans les 10 scénarios sélectionnés.	154
5.10	Taux de détection des mines en fonction du type de sol.	154
5.11	Taux de détection des mines en fonction de la configuration de pose.	154
B.1	Caractéristiques des mines antipersonnel [Jan97]	164
B.2	Détectabilité des mines antipersonnel par un GPR [Dea01a]	166

Liste des algorithmes

1	: Algorithme de détection de ruptures à noyaux (KCD) [DDD05]	100
2	: Algorithme de détection des positions horizontales d'un objet enfoui. .	102
3	: Algorithme de détection des temps de réponse d'un objet enfoui. . . .	104

Table des figures

1.1	Représentation schématique des données Ascan, Bscan et Cscan.	9
1.2	Données Ascan et Bscan réelles enregistrées par un GPR.	9
1.3	Illustration d'une série de mesure réalisée par un GPR. Cette figure est issue de [DA89].	10
1.4	Données Ascan enregistrées par un GPR au dessus du scénario représenté sur la figure 1.3. Cette figure est issue de [DA89].	10
1.5	Donnée Cscan réelle enregistrée par un GPR.	11
1.6	Donnée Ascan réelle enregistrée au dessus d'une terre homogène	12
1.7	Donnée Ascan réelle enregistrée au dessus d'une mine MAUS1 enfouie à 5cm	12
1.8	Choix du seuil T_s pour deux Ascans provenant d'un même Bscan.	13
1.9	Donnée Ascan réelle de la figure 1.7	14
1.10	Clutter et modèle du clutter de l'Ascan figure 1.9	14
1.11	Erreur d'estimation	14
1.12	Ascan après soustraction du modèle du clutter.	14
1.13	Donnée Bscan réelle. L'Ascan de la figure 1.7 est représenté par le trait vertical.	17
1.14	Donnée Ascan de la figure 1.7 après soustraction du prédicteur du clutter.	17
1.15	Donnée Bscan enregistrée au dessus d'une terre homogène.	18
1.16	Interprétation du 2 ^{ème} Bscan singulier issu de la décomposition en valeurs singulières du Bscan représenté sur la figure 1.15. Le produit extérieur $\mathbf{u}_2 \mathbf{v}_2^T$ décrit le comportement de la forme d'onde contenue dans le vecteur \mathbf{u}_2 pour les différentes positions du GPR, l'information spatiale étant contenue dans le vecteur \mathbf{v}_2 . Δx dénote la fréquence d'échantillonnage spatiale suivant x et \mathbf{v}_{2j} la j-ième composante du vecteur \mathbf{v}_2	19
1.17	Décomposition du Bscan de la figure 1.15 par SVD	21
1.18	Valeurs singulières associées aux p Bscans singuliers.	22
1.19	Estimée de la donnée Bscan de la figure 1.15 : $\hat{\mathbf{Y}} = \sum_{i=1}^6 \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T$	22
1.20	Estimée de la matrice \mathbf{C} du Bscan représentée figure 1.15 : $\mathbf{Y}_c = \sum_{i=2}^6 \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T$	22
1.21	Donnée Bscan enregistrée au dessus d'une terre homogène.	22
1.22	Décomposition du Bscan2 par SVD	24
1.23	Valeurs singulières issus de la décomposition du Bscan représenté figure 1.21.	24
1.24	Estimée de la matrice \mathbf{C} : $\mathbf{Y}_c = \sum_{i=3}^6 \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T$ du Bscan représenté figure 1.21.	24

1.25	Réponse fréquentielle d'un filtre ACRC pour $N_w = 5, 10, 15$	26
1.26	Donnée Bscan enregistrée au dessus d'une terre homogène.	26
1.27	Bscan de la figure 1.26 après filtrage ($N_w = 10$).	26
1.28	Donnée Bscan réelle enregistrée au dessus d'une terre homogène.	27
1.29	Donnée Bscan réelle de la figure 1.28 après réduction de clutter.	27
1.30	Réponse du filtre passe haut en p_n d'ordre 2 avec $\alpha = 0.1$ dans le plan (k, w)	30
1.31	Réponse du filtre passe bande symétrique en d d'ordre 2 avec $\alpha_k = 0.05$ et $\alpha_w = 0.1$ dans le plan (k, w)	31
1.32	Donnée Bscan enregistrée au dessus d'une terre homogène.	32
1.33	Bscan de la figure 1.32 après filtrage.	32
1.34	Donnée Bscan enregistrée au dessus d'une terre homogène.	32
1.35	Bscan de la figure 1.34 après filtrage.	32
2.1	Donnée Bscan enregistrée au dessus d'une terre homogène.	44
2.2	Zoom effectué sur le Bscan de la figure 2.1. $t_{1,1}$ et $t_{1,2}$ délimitent la première bande de clutter.	44
2.3	Spectre d'amplitude de la première bande de clutter représentée sur les figures 2.1 et 2.2.	46
2.4	Hyperbole modélisant la réponse d'un objet enfoui et ces asymptotes (lignes pointillées).	47
2.5	Spectre d'amplitude approché d'une hyperbole modélisant la réponse d'une mine pour $ \Delta_x < z_0$ et $\nu = 0$	49
2.6	Spectres d'amplitude approchés du clutter, d'une hyperbole et du filtre numérique pour $\nu = 0$	49
2.7	Modélisation de l'hyperbole de la figure 2.4 par 3 segments de droites.	50
2.8	Spectre d'amplitude d'un segment de droite modélisant le sommet d'une hyperbole pour $ \Delta_s = 10$ cm.	51
2.9	Spectres d'amplitude normalisés du clutter et du sommet de l'hyperbole pour $\nu = 0$ ($x_1 = 1$ m, $ \Delta_s = 10$ cm).	51
2.10	Spectre d'amplitude d'un segment de droite de pente a_h	52
2.11	Spectre d'amplitude d'un segment de droite de pente $-a_h$	52
2.12	Spectres d'amplitude approchés du clutter et des segments de droite modélisant les branches d'une hyperbole pour $\nu = 0$	52
2.13	Spectres d'amplitude approchés du clutter et des segments de droite modélisant les branches d'une hyperbole pour $\nu \neq 0$	52
2.14	Gabarit du filtre passe haut numérique adapté aux Bscans.	54
2.15	Spectre d'amplitude du filtre idéal pour $\nu = 0$	56
2.16	Spectre d'amplitude du filtre réel pour $\nu = 0$	56
2.17	Donnée synthétique représentant un modèle géométrique d'une donnée Bscan.	57
2.18	Donnée synthétique de la figure 2.17 après filtrage. L'amplitude a été normalisée.	57
2.19	Donnée Bscan simulée par la méthode split step.	58
2.20	Donnée Bscan simulée de la figure 2.19 après filtrage.	58

2.21	Donnée Bscan simulée par la méthode split step.	59
2.22	Donnée Bscan simulée de la figure 2.19 après filtrage.	59
2.23	Bscan enregistré au dessus d'une terre homogène recouverte d'herbe.	60
2.24	Bscan de la figure 2.23 après filtrage ($N = 5, M = 51$).	60
2.25	Bscan enregistré au dessus d'une terre homogène.	61
2.26	Bscan de la figure 2.25 après filtrage ($N = 5, M = 51$).	61
2.27	Bscan enregistré au dessus d'une terre homogène.	61
2.28	Bscan de la figure 2.27 après filtrage ($N = 5, M = 51$).	61
2.29	Réponses fréquentielles d'un filtre ACRC pour $N_w = 5, 10, 15$	62
2.30	Réponses fréquentielles du filtre de déclivité et du filtre adapté.	62
2.31	R_s en fonction de R_c pour les différents filtres.	64
2.32	R_b en fonction de R_c pour les différents filtres.	64
2.33	Donnée Cscan enregistrée au dessus d'un sol constitué de sable.	65
2.34	Découpe de la donnée Cscan en 5 rectangles à l'intérieur desquels le clutter est quasiment homogène.	66
2.35	Spectre d'amplitude d'une bande de clutter suivant ν_x pour $L_{i,x} = 1\text{m}$ et $L_{i,x} = 0.3\text{m}$	67
2.36	Spectre d'amplitude d'un disque de rayon $a = 6\text{ cm}$	69
2.37	Spectres du clutter et du disque suivant k_r	70
2.38	Disque de rayon 10 cm après filtrage. Un quart de l'énergie contenue dans le lobe principale du spectre du disque est éliminé par le filtrage.	71
2.39	Disque de rayon 10 cm après filtrage. La moitié de l'énergie contenue dans le lobe principale du spectre du disque est éliminée par le filtrage.	71
2.40	Spectres du clutter, du disque et du filtre suivant k_r	72
2.41	Donnée Cscan réelle.	75
2.42	Modèle géométrique de la donnée Cscan de la figure 2.41.	75
2.43	Donnée Cscan de la figure 2.42 après filtrage.	75
2.44	Configuration pour la méthode split step.	75
2.45	Donnée Cscan synthétique obtenue par la méthode split step.	76
2.46	Donnée Cscan de la figure 2.45 après filtrage.	76
2.47	Donnée Cscan enregistrée au dessus d'un sol constitué de sable.	77
2.48	Donnée Cscan de la figure 2.47 après filtrage.	77
2.49	Donnée Cscan enregistrée au dessus d'une terre recouverte d'herbe.	77
2.50	Donnée Cscan de la figure 2.49 après filtrage.	77
2.51	Donnée Cscan enregistrée au dessus d'une terre recouverte d'herbe.	78
2.52	Donnée Cscan de la figure 2.51 après filtrage.	78
2.53	Donnée Cscan enregistrée au dessus d'un sol constitué de sable.	79
2.54	Donnée Cscan de la figure 2.53 après filtrage.	79
2.55	R_m en fonction de R_c pour les différents filtres ($L_{i,x} = 0.3\text{ m}$).	81
2.56	R_m en fonction de R_c pour les différents filtres ($L_{i,x} = 1\text{ m}$).	81
2.57	Donnée Cscan de la figure 2.49 après réduction de clutter par un filtre ACRC ($N_w = 5$).	81
2.58	Donnée Cscan de la figure 2.49 après réduction de clutter par un filtre ACRC ($N_w = 10$).	81

2.59	Donnée Cscan correspondant à la somme des données Cscan du scénario 11 traitées individuellement par notre filtre. Un seuillage a été effectué préalablement sur chacune des données Cscan filtrées ($\eta_s = 0.1$).	82
2.60	Donnée Cscan correspondant à la somme des données Cscan du scénario 11 traitées individuellement par un filtre ACRC ($N_w=5$). Un seuillage a été effectué préalablement sur chacune des données Cscan filtrées ($\eta_s = 0.1$). 82	
3.1	Détection de ruptures dans une donnée Bscan synthétique suivant l'axe spatial l . A chaque position horizontale l , deux ensembles d'observations \mathbf{x}_1 et \mathbf{x}_2 constitués respectivement de m_1 et m_2 Ascans sont construits et une mesure de dissimilarité entre ces deux ensembles, dénotée $D(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$, est calculée. Les ruptures spatiales sont détectées chaque fois que la mesure de dissimilarité $D(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ est supérieur au seuil η_l	87
3.2	Détection de ruptures suivant l'axe temporel t , dans la donnée Bscan de la figure 3.1, préalablement traitée par le filtre numérique conçu au chapitre précédent. A chaque position verticale t , deux ensembles d'observations \mathbf{x}_1 et \mathbf{x}_2 constitués respectivement de m_1 et m_2 lignes du Bscan sont construits et une mesure de dissimilarité entre ces deux ensembles, dénotée $D(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$, est calculée. Les ruptures temporelles sont détectées chaque fois que la mesure de dissimilarité $D(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ est supérieur au seuil η_t	88
3.3	Cadre adopté pour la détection de ruptures en ligne. Les observations de la série étudiée x_a , $a = 1, 2, \dots$, sont représentées par des cercles suivant a . 89	
3.4	Dans l'espace des hypothèses, l'estimée du support de densité R_x est le segment de l'hypersphère \mathcal{S} délimité par l'hyperplan séparateur \mathcal{W} . L'approche SVM pour l'estimation de la région R_x minimise le volume de la boule de \mathcal{H} contenant la plupart des observations de l'ensemble d'apprentissage. Ceci est équivalent à maximiser la distance entre l'hyperplan \mathcal{W} et l'origine \mathcal{O} de \mathcal{H}	94
3.5	Les observations support hors de marge sont à l'extérieur de R_x . Les observations support de marge sont situées sur le support de R_x . Les observations non support sont à l'intérieur de R_x , soit au dessus de l'hyperplan \mathcal{W} de \mathcal{H}	97
3.6	Les estimateurs SV de support de densité permettent de définir deux régions Σ_1 et Σ_2 qui sont les estimées des supports de densité de \mathbf{x}_1 et \mathbf{x}_2 dans \mathcal{H} . Le cercle représenté correspond à l'intersection du plan \mathcal{P} (défini de façon unique par $\mathbf{f}_1(\cdot)$ et $\mathbf{f}_2(\cdot)$) et la sphère \mathcal{S} . L'intersection de la droite passant par \mathcal{O} et de vecteur directeur $\mathbf{f}_1(\cdot)$ (resp. $\mathbf{f}_2(\cdot)$) avec \mathcal{S} permet de définir \mathbf{c}_1 (resp. \mathbf{c}_2). De même, l'intersection de l'hyperplan \mathcal{W}_1 (resp. \mathcal{W}_2) avec \mathcal{S} permet de définir dans le plan \mathcal{P} deux points, dont l'un est noté \mathbf{p}_1 (resp. \mathbf{p}_2). La situation représentée correspond à une rupture à l'indice a , puisque les deux régions Σ_1 et Σ_2 ne se recouvrent pas.	98
3.7	Méthode de détection de mines antipersonnel. L'étape 1 consiste à détecter les positions horizontales des mines dans la donnée Bscan. L'étape 2 consiste à détecter les temps de réponses des mines détectées à l'étape 1. 105	

3.8	Donnée Bscan synthétique contenant les réponses de deux objets enfouis. L'un est situé aux positions horizontales $\{0.33, \dots, 0.63\}$ et à une profondeur de 7 cm. L'autre est situé aux positions horizontales $\{1.73, \dots, 2.03\}$ et à une profondeur de 2 cm.	107
3.9	Mesure du contraste $I_1(l)$ pour le Bscan de la figure 3.8. Deux objets enfouis ont été détectés. L'un est situé entre les positions horizontales $l = 0.38$ et $l = 0.58$ et l'autre entre $l = 1.75$ et $l = 2$	108
3.10	Sous-Bscan, prétraité par filtrage numérique, contenant la réponse de l'objet détecté aux positions horizontales $l = \{0.38, \dots, 0.58\}$	108
3.11	Mesure du contraste normalisée $I_2(t)$ pour le sous-Bscan de la figure 3.10.	109
3.12	Mesure du contraste normalisée $\tilde{I}_2(t)$ pour le sous-Bscan de la figure 3.10.	109
3.13	Sous-Bscan, prétraité par filtrage numérique, contenant la réponse de l'objet détecté aux positions horizontales $l = \{1.75, \dots, 2\}$	109
3.14	Mesure du contraste normalisée $\tilde{I}_2(t)$ pour le sous-Bscan de la figure 3.13.	109
3.15	Donnée Bscan synthétique contenant les réponses de deux objets enfouis. L'un est situé aux positions $l = \{1, \dots, 1.2\}$ et l'autre aux positions $l = \{2.45, \dots, 2.75\}$	110
3.16	Mesure du contraste $I_1(l)$ pour le Bscan de la figure 3.15 ($m_1 = m_2 = 5$). Plusieurs ruptures sont détectées. Certaines proviennent de la réponse des objets, d'autres proviennent des variations du clutter suivant l	111
3.17	Mesure du contraste $I_1(l)$ pour le Bscan de la figure 3.15 ($m_1 = m_2 = 7$). Deux objets enfouis ont été détectés. L'un est situé aux positions $l = \{0.99, \dots, 1.35\}$, et l'autre aux positions $l = \{2.4, \dots, 2.7\}$	111
3.18	Sous-Bscan contenant la réponse de l'objet détecté aux positions horizontales $l = \{0.99, \dots, 1.35\}$	112
3.19	Mesure du contraste normalisée $\tilde{I}_2(t)$ pour le sous-Bscan de la figure 3.18.	112
3.20	Sous-Bscan contenant la réponse de l'objet détecté aux positions horizontales $l = \{2.4, \dots, 2.7\}$	112
3.21	Mesure du contraste normalisée $\tilde{I}_2(t)$ pour le sous-Bscan de la figure 3.20.	112
3.22	Donnée Bscan enregistrée au dessus d'une terre homogène. Les réponses de deux mines métalliques de type MAUS1 ont été enregistrées.	113
3.23	Mesure du contraste $I_1(l)$ pour le Bscan de la figure 3.22. Deux objets enfouis ont été détectés. Le premier aux positions $l = \{0.14, \dots, 0.28\}$, et le second aux positions $l = \{0.54, \dots, 0.68\}$	113
3.24	Sous-Bscan contenant la réponse de l'objet détecté aux positions horizontales $l = \{0.14, \dots, 0.28\}$	114
3.25	Mesure du contraste normalisée $\tilde{I}_2(t)$ pour le sous-Bscan de la figure 3.24.	114
3.26	Sous-Bscan contenant la réponse de l'objet détecté aux positions horizontales $l = \{0.54, \dots, 0.68\}$	114
3.27	Mesure du contraste normalisée $\tilde{I}_2(t)$ pour le sous-Bscan de la figure 3.26.	114
3.28	Donnée Bscan enregistrée au dessus d'une terre homogène. Les réponses de deux mines plastiques de type VSMK2 ont été enregistrées.	115
3.29	Mesure du contraste $I_1(l)$ pour le Bscan de la figure 3.22. Deux objets enfouis ont été détectés. Le premier aux positions $l = \{0.14, \dots, 0.26\}$, et le second aux positions $l = \{0.54, \dots, 0.68\}$	115

3.30	Sous-Bscan contenant la réponse de l'objet détecté aux positions horizontales $l = \{0.14, \dots, 0.26\}$	115
3.31	Mesure du contraste normalisée $\tilde{I}_2(t)$ pour le sous-Bscan de la figure 3.30.	115
3.32	Sous-Bscan contenant la réponse de l'objet détecté aux positions horizontales $l = \{0.54, \dots, 0.68\}$	116
3.33	Mesure du contraste normalisée $\tilde{I}_2(t)$ pour le sous-Bscan de la figure 3.32.	116
3.34	Donnée Bscan enregistrée au dessus d'une terre homogène recouverte d'herbe. Les réponses de d'une mine plastique de type AUPS et d'une mine métallique de type MAUS1 ont été enregistrées.	116
3.35	Mesure du contraste $I_1(l)$ pour le Bscan de la figure 3.34. Deux objets enfouis ont été détectés. Le premier aux positions $l = \{0.04, \dots, 0.26\}$, et le second aux positions $l = \{0.52, \dots, 0.66\}$	116
3.36	Sous-Bscan contenant la réponse de l'objet détecté aux positions horizontales $l = \{0.04, \dots, 0.26\}$	117
3.37	Mesure du contraste normalisée $\tilde{I}_2(t)$ pour le sous-Bscan de la figure 3.36.	117
3.38	Sous-Bscan contenant la réponse de l'objet détecté aux positions horizontales $l = \{0.52, \dots, 0.66\}$	117
3.39	Mesure du contraste normalisée $\tilde{I}_2(t)$ pour le sous-Bscan de la figure 3.38.	117
4.1	Modèle anneau pour le filtrage morphologique de l'image contenant les contours fermés.	121
4.2	Organigramme de la méthode de détection automatique de mines antipersonnel pour des données Cscan.	123
4.3	Configuration pour le scénario 11 de la campagne MACADAM	124
4.4	Donnée Cscan résultant de la somme des Cscans après filtrage et seuillage pour le scénario 11. Une échelle logarithmique est appliquée sur l'amplitude des échantillons du Cscan.	124
4.5	Image des contours pour le Cscan de la figure 4.4.	125
4.6	Image des contours fermés.	125
4.7	Image des contours filtrés ($r_{int} = 3$ cm et $r_{ext} = 15$ cm).	125
4.8	Association des contours de l'image représentée sur la figure 4.7. Pour chaque disque, il est indiqué : (le nombre de contours associés / l'étalement suivant x).	125
4.9	Image de détection. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.	126
4.10	Superposition de l'image de détection et du Cscan de la figure 4.4.	126
4.11	Configuration pour le scénario 4 de la campagne MACADAM.	126
4.12	Donnée Cscan résultant de la somme des Cscans après filtrage et seuillage pour le scénario 4. Une échelle logarithmique est appliquée sur l'amplitude des échantillons du Cscan.	126
4.13	Image des contours pour le Cscan de la figure 5.27.	127
4.14	Image des contours filtrés ($r_{int} = 3$ cm et $r_{ext} = 15$ cm).	127
4.15	Image de détection. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.	127
4.16	Superposition de l'image de détection et du Cscan de la figure 5.27.	127

4.17	Superposition de l'image de détection et du Cscan résultant de l'étape 1, lorsque les données Cscan du scénario 11, ne sont pas prétraitées par filtrage numérique. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.	128
4.18	Superposition de l'image de détection et du Cscan résultant de l'étape 1, lorsque les données Cscan du scénario 4, ne sont pas prétraitées par filtrage numérique. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.	128
4.19	Paramètres statistiques déterminés sur certaines sous-bandes et sur le signal d'origine. La position centrale de chacune des mines est représentée par un cercle noir.	129
4.20	Donnée Cscan résultant de la somme des Cscans après filtrage par un filtre ACRC d'ordre 5 et seuillage pour le scénario 11. Une échelle logarithmique est appliquée sur l'amplitude des échantillons du Cscan.	130
4.21	Image de détection pour le Cscan de la figure 4.20. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.	130
4.22	Image de détection pour la méthode de détection proposée dans [Per01]. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.	131
4.23	Image de détection pour la méthode de détection proposée dans [Per01]. Les contours pour lesquels $N_m \leq 3$ sont éliminés. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.	131
4.24	Donnée Cscan résultant de la somme des Cscans après filtrage par un filtre ACRC d'ordre 5 et seuillage pour le scénario 4. Une échelle logarithmique est appliquée sur l'amplitude des échantillons du Cscan.	131
4.25	Image de détection pour le Cscan de la figure 4.24. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.	131
4.26	Image de détection pour la méthode de détection proposée dans [Per01]. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.	132
4.27	Image de détection pour la méthode de détection proposée dans [Per01]. Les contours pour lesquels $N_m \leq 3$ sont éliminés. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.	132
5.1	Configuration de pose des mines pour chaque scénario de la campagne MACADAM. On cherche à détecter les mines dans des zones proches de leurs positions réelles.	137
5.2	Mesure du contraste $I_1(l)$ pour un Bscan du scénario 2 et possible emplacement d'un objet.	140
5.3	Mesure du contraste $I_1(l)$ pour un Bscan du scénario 2 et possible emplacement de deux objets.	140

5.4	Image de détection des positions spatiales pour l'ensemble des données Bscan du scénario 2 ($\eta_l = 0.3$). Les positions réelles des mines sont délimitées par des cercles rouges. Les positions détectées sont en blanc.	141
5.5	Courbe COR pour la détection des positions horizontales des mines dans les données Bscan du scénario 2.	141
5.6	Image de détection des temps de réponse pour l'ensemble des sous-Bscans du scénario 2 ($l = \{0.4, \dots, 0.8\}$, $\eta_t = 0.1$). Les positions réelles des mines sont délimitées par des rectangles rouges. Les positions détectées sont en blanc.	143
5.7	Courbe COR pour la détection des réponses temporelles des mines dans les sous-Bscans du scénario 2.	143
5.8	Courbes COR pour la détection des réponses temporelles des mines dans les données Bscan du scénario 2 pour différents filtres.	144
5.9	Photo pour le scénario 4. Les positions des mines sont indiquées par des croix.	145
5.10	Image de détection des positions spatiales des mines suivant x pour le scénario 4 ($\eta_l = 0$). Les positions réelles des mines sont délimitées par des cercles rouges. Les positions détectées sont en blanc.	145
5.11	Courbe COR pour la détection des positions horizontales des mines dans les données Bscan du scénario 4.	145
5.12	Courbe COR pour la détection des réponses temporelles des mines dans les données Bscan du scénario 4.	145
5.13	Photo pour le scénario 5. Les positions des mines sont indiquées par des croix.	146
5.14	Image de détection des positions spatiales des mines suivant x pour le scénario 5 ($\eta_l = 0.3$). Les positions réelles des mines sont délimitées par des cercles rouges. Les positions détectées sont en blanc.	147
5.15	Courbe COR pour la détection des positions horizontales des mines dans les données Bscan du scénario 5.	147
5.16	Mesure du contraste $I_1(l)$ pour le Bscan obtenu par la concaténation des données Ascan enregistrées suivant y à la position $x = 0.2$	147
5.17	Mesure du contraste $I_1(l)$ pour le Bscan obtenu par la concaténation des données Ascan enregistrées suivant y à la position $x = 0.6$	147
5.18	Superposition de l'image de détection et du Cscan résultant de l'étape 1, pour les données Cscan du scénario 11 ($S = 0.1$). Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.	151
5.19	Courbe COR pour les données Cscan du scénario 11.	151
5.20	Superposition de l'image de détection et du Cscan résultant de l'étape 1, pour les données Cscan du scénario 7 ($S = 0.1$). Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.	151
5.21	Courbe COR pour les données Cscan du scénario 7.	151

5.22	Superposition de l'image de détection et du Cscan résultant de l'étape 1, pour les données Cscan du scénario 4 ($S = 0.18$). Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.	152
5.23	Courbe COR pour les données Cscan du scénario 4.	152
5.24	Donnée enregistrée par un détecteur de métal pour le scénario 17.	153
5.25	Somme des Cscans filtrés pour le scénario 17.	153
5.26	Donnée enregistrée par un détecteur de métal pour le scénario 4.	154
5.27	Somme des Cscans filtrés pour le scénario 4.	154
A.1	Les différentes sous-catégories de mines antipersonnel. Les photos des mines sont issues de [Mas04].	160
A.2	Répartition des mines dans le monde. Cette carte est issue de [Des05]	161
B.1	Scenario d'essais pour l'enregistrement des données MACADAM. Plusieurs mines antipersonnel ont été enfouies à différentes profondeurs dans un sol constitué de terre.	163
B.2	Photographies des mines antipersonnel Tecnovar-MAUS1 (en haut à gauche), Valsella VSMK2 (en haut à droite), Tecnovar AUPS (en bas à gauche) et Tecnovar VAR40 (en bas à droite). Les photographies sont issues de [Dea01b].	165
B.3	Disposition des scénarios le long de la ligne de mesure.	167
B.4	Configuration des différents scénarios. Pour chaque scénario, la configuration de pose des mines, le type de mines ainsi que la nature du terrain sont donnés.	168
C.1	Superposition de l'image de détection et du Cscan résultant de l'étape 1, pour les données Cscan du scénario 2. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.	169
C.2	Courbe COR pour le scénario 2.	169
C.3	Superposition de l'image de détection et du Cscan résultant de l'étape 1, pour les données Cscan du scénario 3. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.	170
C.4	Courbe COR pour le scénario 3.	170
C.5	Superposition de l'image de détection et du Cscan résultant de l'étape 1, pour les données Cscan du scénario 8. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.	170
C.6	Courbe COR pour le scénario 8.	170
C.7	Superposition de l'image de détection et du Cscan résultant de l'étape 1, pour les données Cscan du scénario 9. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.	171
C.8	Courbe COR pour le scénario 9.	171
C.9	Superposition de l'image de détection et du Cscan résultant de l'étape 1, pour les données Cscan du scénario 12. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées.	171
C.10	Courbe COR pour le scénario 12.	171

C.11	Superposition de l'image de détection et du Cscan résultant de l'étape 1, pour les données Cscan du scénario 13. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées. . . .	172
C.12	Courbe COR pour le scénario 13.	172
C.13	Superposition de l'image de détection et du Cscan résultant de l'étape 1, pour les données Cscan du scénario 17. Les cercles noirs indiquent les positions réelles des mines. Les cercles roses les positions détectées. . . .	172
C.14	Courbe COR pour le scénario 17.	172

Bibliographie

- [Aa01] T. Antonini and al. Déminage terrestre : Projet isl demine, période 1997-2000. Technical report, Institut Franco-allemand de recherches de Saint-Louis., 2001.
- [BG98] A. Bitri and G. Grandjean. Frequency-wavenumber modeling and migration of 2d gpr data in moderately heterogenous dispersive media. *Geophysics*, 46(3) :287–301, 1998.
- [BN93] M. Basseville and I. Nikiforov. *Detection of Abrupt Changes - Theory and Application*. Prentice-Hall, 1993.
- [Bru99] H. Brunzell. Detection of shallowly buried objects using impulse radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(2) :875–886, March 1999.
- [BS96] J. Bourgeois and S. Smith. A fully three dimensionnal simulation of a ground penetrating radar : Fdtd theroy compared with experiment. *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, 40(4) :36–44, Jan 1996.
- [Bur01] G. Burel. *Introduction au traitement d'images*. Hermes science, 2001.
- [Car99] D. Carevic. Kalman filter-based approach to target detection and target background separation in ground prenetrating radar data. *SPIE conference on Detection Remediation Technologies, Minelike targets IV*, pages 1284–1288, 1999.
- [CCC97] D. Carevic, M. Craig, and I. Chant. Modelling GPR Echoes from Land Mines Using Linear Combination of Exponentially Damped Sinusoids. *SPIE, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets II*, 3079 :568–580, 1997.
- [Che98] L. Chety. Handheld Mine Detection Test Platform - SDD, IDD. Technical Report TME/DM/1998/4330/LC/BDH, Thomson-CSF Missile Electronics, December 1998.
- [Cla96] J. F. Claerbout. *Imaging the Earth's Interior*. GNU General Public License, 1996.
- [CP97] C.-C. Chen and L. Peters Jr. Buried Unexploded Ordnance Identification Via Complex Natural Resonances. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 45(11) :1645–1654, November 1997.

- [CU01] B. Cagnoly and T.J. Ulrych. Singular value decomposition and wavy reflections in ground-penetrating radar images of base surge deposits. *Journal of Applied Geophysics*, 48 :175–182, 2001.
- [DA89] J. L. Davis and A. P. Annan. Ground -Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37 :531–551, 1989.
- [Dan04] D. J. Daniels. *Ground-Penetrating Radar, 2nd Edition*. IEE-uk, 2004.
- [DD04] F. Desobry and M. Davy. Dissimilarity measures in feature space. *IEEE ICASSP Montreal Canada*, 2004.
- [DDD05] F. Desobry, M. Davy, and C. Doncarli. An online kernel change detection algorithm. *IEEE Trans. Sig. Proc.*, 53 :2961–2974, Aug 2005.
- [DDGD06] M. Davy, F. Desobry, A. Gretton, and C. Doncarli. An online support vector machine for abnormal events detection. *Signal processing*, 86 :2009–2025, 2006.
- [Dea01a] J. T. Dean. Minetest. Technical report, European Commission, DG Joint Research Centre Institute for the Protection and Security of the Citizen, Humanitarian Security Unit, 2001.
- [Dea01b] J. T. Dean. Project mimeva, study of generic mine-like objects for research and development in systems for humanitarian demining. Technical report, European Commission, DG Joint Research Centre Institute for the Protection and Security of the Citizen, Humanitarian Security Unit, 2001.
- [Dem97] M. Demangeon. Lutte contre les mines antipersonnel : Comment éradiquer ce fléau mondial? Technical report, Mémoire de DEA, Université Paris X, 1997.
- [Des04] F. Desobry. *Méthodes à noyau pour la détection de rupture*. PhD thesis, Thèse de doctorat de l’Ecole Centrale de Nantes et de l’Université de Nantes, 2004.
- [Des05] J. Desclaux. Landmine monitor report 2005 : Toward a mine-free world. Technical report, International Campaign to Ban Landmines, 2005.
- [DHP96] K. Demarest, Z. Huang, and R. Plumb. An ftd near to far zone transformation for scatterers buried in stratified ground. *IEEE Transactions on antenna and propagation*, 44 :1150–1157, August 1996.
- [dMG00] A. Van der Merwe and I. J. Gutpa. A Novel Signal Processing Technique for Clutter Reduction in GPR Measurements of Small, Shallow Land Mines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(6) :2627–2637, November 2000.
- [DQ96] D. Declercq and A. Quinquis. *Le filtrage des signaux*. Hermès, 1996.
- [FL99] M. Fritzsche and O. Löhlein. DREAM Program - Multisensor Fusion. Technical Report WP 2, DaimlerChrysler, January 1999.
- [FP98] A. Farina and A. Protopa. New Results on Linear Prediction for Clutter Cancellation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 24(3) :275–285, May 1998.

- [GB00] A. Gunatilaka and B. A. Baertlein. A subspace decomposition technique to improve gpr imaging of anti-personnel mines. *Proceedings of SPIE, Aero-sense 2000 : Detection and Remediation technologies for mines and minelike targets*, 4038(5) :1008–1018, 2000.
- [GD03] A. Gretton and F. Desobry. Online one-class nu-svm, an application to signal segmentation. *IEEE ICASSP, Hong-Kong, China*, April 2003.
- [GKN01] P. D. Gader, J. M. Keller, and B.N. Nelson. Recognition technology for the detection of buried landmines. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, 9(1) :31–43, Feb 2001.
- [GVdMC98] I. J. Gupta, A. Van der Merwe, and C. C. Chen. Extraction of complex resonances associated with buried targets. *SPIE*, 3392 :1022–1032, april 1998.
- [Hay96] S. Haykin. *Adaptive filter theory - Third edition*. Prentice-Hall, 1996.
- [HG02] K.C. Ho and P. D. Garder. A Linear Prediction Land Mine Detection Algorithm for Hand Held Ground Penetrating Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(6) :1374–1384, June 2002.
- [Jan97] Jane's. *Mines and Mine Clearance*. Jane's, first edition, 1997.
- [Kay93] S. M. Kay. *Fundamentals of statistical signal processing : Estimation theory*. Prentice-hall, 1993.
- [Kay98] S. M. Kay. *Fundamentals of statistical signal processing : Detection theory*. Prentice-hall, 1998.
- [KD06] A. Klapuri and M. Davy. *Signal processing methods for music transcription*. Springer New York, 2006.
- [LSB⁺04] S. Lambot, E. Slob, I. van den Bosch, B. Stockbroeckx, and M. Vanclooster. Modeling of ground penetrating radar for accurate characterizatoin of subsurface electric properties. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(11) :2555–2567, November 2004.
- [Mar87] S. L. Marple Jr. *Digital Spectral Analysis with Applications*, chapter 11, pages 303–330. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1987.
- [Mas04] S. Maslen. Guide de la lutte antimines. Technical report, Centre International de Déminage Humanitaire, Genève, Janvier 2004.
- [MB03] N. Milisavljevic and I. Bloch. Sensor fusion in anti-personnel mine detection using a two-level belief function model. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-PART C : applocations and reviews*, 33(2) :269–283, May 2003.
- [MC03] V. Munshi and L. M. Collins. Physics model-based signal processing of gpr for subsurface object detection and discrimination. Technical report, Department of electrical and computer engineering, Duke University, 2003.
- [Mil01] N. Milisavljevic. *Analyse et Fusion par la Théorie des Fonctions de Croyances de Données Multi-sensorielles pour la Détection de Mines Anti-personnelles*. PhD thesis, Telecom Paris, 2001.

- [ML03] X. Millard and Q. Liu. A fast volume integral equation solver for electromagnetic scattering from large inhomogeneous objects in planarly layered media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 51(9) :2393–2401, September 2003.
- [MMR⁺01] S. Mika, K. S. Müller, G. Rätsch, K. Tsuda, and B. Schölkopf. An introduction to kernel-based learning algorithms. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 12(2), March 2001.
- [OS75] A. V. Oppenheim and D. W. Shafer. *Digital Signal Processing*. Prentice Hall International Editions, 1975.
- [PDV06] D. Potin, E. Duflos, and P. Vanheeghe. Landmines ground penetrating radar signal enhancement by digital filtering. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 44(9) :2393–2406, Sep 2006.
- [PDVB04] S. Perrin, E. Duflos, P. Vanheeghe, and A. Bibaut. Multisensor fusion in the frame of evidence theory for landmines detection. *IEEE Trans. on Systems, Man, and cybernetics, Part C : Applications and Review*, 34(4) :485–498, Nov 2004.
- [PDY94] L. P. Peters, J. D. Daniels, and J. D. Young. Ground Penetrating Radar as a Subsurface Environmental Sensing Tool. *Proceedings of the IEEE*, 82(12) :1802–1822, December 1994.
- [Per01] S. Perrin. *Contribution à l'Algorithmique Multicapteur Pour la Détection de Mines Antipersonnel*. PhD thesis, Ecole Centrale de Lille et Université des Sciences et Technologies de Lille, 2001.
- [Per04] F. Pereira. *Analyse spatio-temporelle du champ géomagnétique et des processus d'accélération solaires observés en émission radio*. PhD thesis, Université d'Orléans, 2004.
- [PVD05] D. Potin, P. Vanheeghe, and E. Duflos. Detection of buried landmines by an abrupt change detection algorithm. *IMACS world congress*, Paris, France 2005.
- [PVDD06] D. Potin, P. Vanheeghe, E. Duflos, and M. Davy. An abrupt change detection algorithm for buried landmines localization. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 44(2) :260–272, Feb 2006.
- [Rej02] F. Rejiba. *Modélisation de la propagation des ondes électromagnétiques en milieux hétérogènes : application au radar sol*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2002.
- [RY87] A. Rahman and K.-B. Yu. Total Least Squares Approach for Frequency Estimation Using Linear Prediction. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 35(10) :1440–1454, October 1987.
- [SPST⁺01] B. Schölkopf, J. Platt, J. Shawe-Taylor, A. Smola, and R. Williamson. Estimating the support of a high dimensional distribution. 13(7) :1443–1471, 2001.
- [SS02] A. Smola and B. Schölkopf. Learning with kernels. *MIT press*, 2002.

- [TEL04] S. Tjora, E. Eide, and L. Lundheim. Evaluation of methods for ground bounce removal in gpr utility mapping. *Tenth international conference on Ground Penetrating Radar, 21-24 June, Delft, the Netherlands*, 2004.
- [Vra03] V. Vrabie. *Statistiques d'ordre supérieur : applications en géophysique et électrotechnique*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2003.
- [XMR02] X. Xu, E. Miller, and C. Rappaport. Statistical method to detect subsurface objects using array ground penetrating radar data. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 40(4) :963–976, April 2002.
- [YKF03] A. Yarovoy, V. Kovalenko, and A. Fogar. Impact of ground clutter on buried object detection by ground penetrating radar. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International Volume 2, Issue , 21-25 July 2003*, 2 :755 – 757, 2003.
- [ZC05] Q. Zhu and L. M. Collins. Application of feature extraction methods for landmine detection using the wichmann/niitek ground penetrating radar. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 43(1) :81–85, Jan 2005.
- [ZCB⁺02] A. M. Zoubir, I. J. Chant, C. L. Brown, B. Barkat, and C. Abeynayake. Signal processing techniques for landmine detection using impulse ground penetrating radar. *IEEE sensors journal*, 2(1) :41–51, February 2002.

Résumé

La multiplication des conflits de part le monde a eu pour principale conséquence de disséminer des millions de mines antipersonnel qui mettent en danger la vie des populations et constituent une entrave au développement économique des régions concernées. Dans ce mémoire, de nouvelles techniques de traitement du signal sont proposées pour la détection des mines antipersonnel dans les données enregistrées par un GPR (Ground Penetrating Radar). Deux filtres numériques sont tout d'abord conçus pour réduire le clutter, qui constitue un ensemble de phénomènes indésirables, dans les données de type Bscan et Cscan fournies par le GPR. Ces deux types de données représentent respectivement des images de tranches verticales et horizontales du sous-sol. La conception des filtres nécessite une modélisation géométrique du clutter et d'une signature de mine, pour chaque type de données, suivie d'une analyse spectrale permettant de définir le gabarit du filtre idéal. Ensuite, une nouvelle méthode de détection, basée sur une technique de détection de ruptures non paramétrique, est proposée afin de localiser automatiquement les réponses des mines antipersonnel sur des données Bscan. La méthode consiste à rechercher les ruptures spatiales suivant la direction des mesures afin de détecter les positions horizontales des mines et les ruptures suivant l'axe temporel afin de détecter les temps de réponse des mines. Une méthode de détection, basée sur l'extraction de contours fermés, est également proposée pour localiser les réponses des mines sur des données Cscan. Les performances de ces deux méthodes de détection sont évaluées par le calcul de probabilité de détection et de fausses alarmes.

Mots clés : Radar à Pénétration de sol, Réduction de clutter, filtrage numérique, détection de ruptures, SVM

Abstract

The millions of landmines spread out over the planet are not only a humanitarian disaster, they also hinder the social and economic development of the concerned countries. In this thesis, new signal processing methods are proposed for the detection and localization of landmines on data recorded by a GPR (Ground Penetrating Radar). First, two digital filters are designed in order to remove clutter in Bscan and Cscan data delivered by GPRs. These two kinds of data are respectively interpreted as vertical and horizontal slices of the ground. In order to design the digital filters, a frequency analysis of a clutter geometrical model and a geometrical model of a signal coming from a landmine is led for each type of data. Second, a new detection method, based on a nonparametric abrupt changes detection technique, is proposed in order to detect and localize landmines in Bscan data. The method consists in searching spatial abrupt changes in order to detect the possible horizontal landmines position and in searching time abrupt changes in order to detect the buried objects response times. A detection method, based on contours extraction, is also proposed in order to automatically localize landmines in Cscan data. The performances of these two landmines detection method are studied in terms of detection probability and false alarm probability.

Keywords : Ground Penetrating Radar, Clutter removal, digital filtering, Abrupt change detection, SVM