

# Chapitre 2

## La réduction de clutter

### 2.1 Introduction

La réduction de clutter est une étape indispensable de prétraitement des données issues du GPR, afin de pouvoir appliquer des méthodes de détection efficaces. En effet, celle-ci doit permettre d'augmenter le rapport signal sur bruit des objets qu'il faut détecter. Dans ce chapitre, une méthode simple et nouvelle, basée sur l'utilisation de filtres numériques, est utilisée pour réduire le clutter sur des données Bscan et Cscan. On se focalise plus particulièrement sur le cas où les réponses des mines sont noyées dans celle de l'interface air-sol et où des méthodes de réduction de clutter, telles que celles décrites dans le paragraphe 1.3.1 sont inefficaces. Les deux filtres conçus respectivement pour le filtrage des données Bscan et Cscan doivent permettre de réduire significativement le clutter tout en préservant les signatures caractéristiques d'objets enfouis sur ces données.

La section 2.2 présente la conception du filtre numérique adapté aux données Bscan. Le filtre numérique adapté aux données Cscan est décrit dans la section 2.3.

### 2.2 Conception d'un filtre numérique adapté aux données Bscan

Sur des données Bscan, enregistrées par un radar à pénétration de sol comme celui de la figure 2.1, le clutter est constitué de trois bandes quasiment horizontales tandis que les réponses des mines antipersonnel, apparaissent sous forme d'hyperboles. Le filtre doit être conçu de façon à filtrer les bandes horizontales (clutter) tout en préservant les hyperboles (réponses des mines). Ainsi des méthodes de détection, qui recherchent la présence d'hyperbole sur des Bscans, telles que celles proposées dans ([GKN01], [ZC05], [PVDD06]), pourront être utilisées par la suite. Une analyse comparative des spectres

d'amplitude approchés du clutter et d'une signature de mine est réalisée, afin de mettre en évidence, les composantes fréquentielles du clutter qui peuvent être éliminées, sans pour autant apporter des distortions significatives aux signaux provenant des mines. A partir de ce résultat, le gabarit d'un filtre numérique optimal pour la réduction de clutter sur des données Bscans est construit. Cette méthode de réduction de clutter a été présentée dans [PDV06].

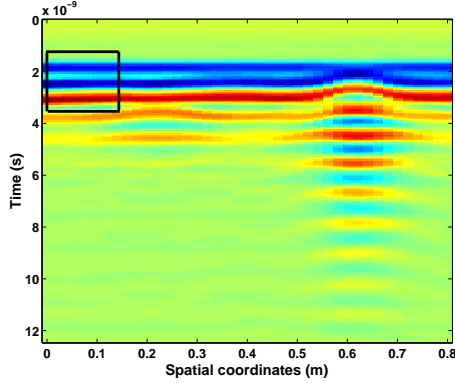


FIG. 2.1: Donnée Bscan enregistrée au dessus d'une terre homogène.

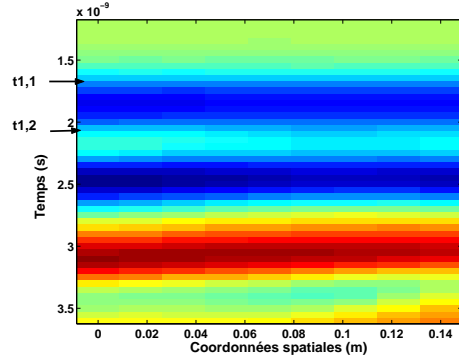


FIG. 2.2: Zoom effectué sur le Bscan de la figure 2.1.  $t_{1,1}$  et  $t_{1,2}$  délimitent la première bande de clutter.

### 2.2.1 Modélisation géométrique et analyse fréquentielle du clutter

Une donnée Bscan peut être définie par une fonction, notée  $I(x, t)$ , où  $x$  représente la coordonnée spatiale variant de 0 à  $x_1$  et  $t$  le temps allant de 0 à  $T$ . Sur une donnée Bscan typique (voir Fig. 2.1), le clutter apparaît sous forme de bandes horizontales. Ces bandes ayant un fort contraste, elles peuvent être modélisées géométriquement par une fonction rectangle. Chaque bande de clutter peut ainsi être modélisée par la fonction  $\Pi_i(x, t)$ , définie de la façon suivante :

$$\Pi_i(x, t) = \Pi_{i,1}(x)\Pi_{i,2}(t) \quad (2.1)$$

avec

$$\begin{cases} \Pi_{i,1}(x) = A_i & \text{si } x \in [0, x_1] \\ \Pi_{i,1}(x) = 0 & \text{si } x \notin [0, x_1] \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \Pi_{i,2}(t) = A_i & \text{si } t \in [t_{i,1}, t_{i,2}] \\ \Pi_{i,2}(t) = 0 & \text{si } t \notin [t_{i,1}, t_{i,2}] \end{cases}$$

où  $A_i$  est l'amplitude de la  $i$ -ième bande de clutter tandis que  $t_{i,1}$  et  $t_{i,2}$  sont les instants temporels qui délimitent la  $i$ -ième bande de clutter (Fig. 2.2).

- **Analyse fréquentielle d'une bande de clutter**

On considère maintenant une donnée Bscan constituée uniquement de la  $i$ -ième bande de clutter. Ce Bscan peut être modélisé par la fonction suivante :

$$I_c(x, t) = \Pi_i(x, t) \quad (2.2)$$

Afin de construire un filtre capable de réduire le clutter, on analyse le spectre d'une bande de clutter. La représentation spectrale est obtenue en prenant la transformée de Fourier continue bidimensionnelle de  $I_c(x, t)$ , notée  $I_c(\nu_x, \nu)$ , où  $\nu_x$  est la fréquence spatiale et  $\nu$  la fréquence temporelle :

$$I_c(\nu_x, \nu) = \int_0^{x_1} \int_{t_{i,1}}^{t_{i,2}} I_c(x, t) e^{-2i\pi x \nu_x} e^{-2i\pi \nu t} dx dt \quad (2.3)$$

après calcul on obtient :

$$I_c(\nu_x, \nu) = A_i x_1 (t_{i,2} - t_{i,1}) e^{-i\pi(x_1 \nu_x + (t_{i,1} + t_{i,2}))\nu} \text{sinc}(\pi x_1 \nu_x) \text{sinc}(\pi(t_{i,2} - t_{i,1})\nu) \quad (2.4)$$

avec sinc la fonction sinus cardinal ( $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$ ). Le spectre d'amplitude de la  $i$ -ième bande de clutter est donné par la relation suivante :

$$|I_c(\nu_x, \nu)| = A_i x_1 T_i \text{sinc}(\pi x_1 \nu_x) \text{sinc}(\pi T_i \nu) \quad (2.5)$$

où  $T_i$  est la largeur de la  $i$ -ième bande de clutter ( $T_i = t_{i,2} - t_{i,1}$ ). En considérant que l'énergie principale d'une telle fonction est située à l'intérieur des deux premiers lobes des fonctions sinus cardinal, l'énergie principale de la  $i$ -ième bande de clutter est située à l'intérieur du sous espace  $S_c$ , défini par :

$$S_c = \left\{ (\nu_x, \nu) \mid \left| \nu_x \right| \in \left[ 0, \frac{2}{x_1} \right], |\nu| < \frac{2}{T_i} \right\} \quad (2.6)$$

Un exemple de spectre d'amplitude d'une bande de clutter est représenté Fig. 2.3 pour un Bscan dont les paramètres sont  $x_1 = 1$  m,  $t_{1,1} = 1.5 \cdot 10^{-9}$ s and  $t_{1,2} = 2 \cdot 10^{-9}$ s (Fig. 2.2). L'énergie principale d'une telle bande de clutter est contenue dans le sous espace  $S_c$  tel que :

$$S_c = \{ (\nu_x, \nu) \mid |\nu_x| \in [0, 2], |\nu| \in [0, 4 \cdot 10^9] \} \quad (2.7)$$

- **Analyse fréquentielle du clutter**

Sur une donnée Bscan réelle comme celle représentée Fig.2.1, le clutter est constitué de trois bandes horizontales. Par conséquent, un modèle géométrique du clutter pour cette donnée Bscan peut être défini de la façon suivante :

$$I_{clutter}(x, t) = \sum_{i=1}^3 \Pi_i(x, t) \quad (2.8)$$

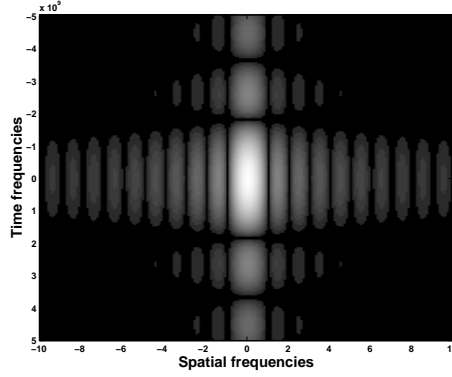


FIG. 2.3: Spectre d'amplitude de la première bande de clutter représentée sur les figures 2.1 et 2.2.

Le spectre totale du clutter est obtenu en utilisant la transformée de Fourier définie par la relation (2.3) et s'écrit :

$$I_{clutter}(\nu_x, \nu) = \sum_{i=1}^3 \Pi_i(\nu_x, \nu) \quad (2.9)$$

où  $\Pi_i(\nu_x, \nu)$  est le spectre de la  $i$ -ième bande de clutter. Ainsi, le spectre d'amplitude du clutter est donné par :

$$|I_{clutter}(\nu_x, \nu)| = \left| \sum_{i=1}^3 \Pi_i(\nu_x, \nu) \right| \quad (2.10)$$

Autrement dit, l'amplitude du spectre total du clutter est égale à l'amplitude de la somme cohérente des spectres de chacune des bandes du clutter. Ainsi, le spectre d'amplitude du clutter ne peut pas être plus large que le plus large des spectres parmi  $\{\Pi_i(\nu_x, \nu)\}$ ,  $i = 1, \dots, 3$ . Ce dernier constitue un cas limite pour la sélection de la fréquence de coupure du filtre numérique. En effet, si l'on sélectionne la bande atténuée du filtre de sorte que les deux premiers lobes du sinus cardinal de la bande de clutter dont l'étalement spectrale est le plus grand soient éliminés, on est assuré de filtrer la majeure partie du clutter. Par conséquent, pour concevoir notre filtre, on ne s'intéresse qu'à la bande de clutter qui aura le spectre le plus large ou de façon équivalente la plus petite valeur pour  $T_i$ . L'énergie d'une telle bande de clutter est située à l'intérieur du sous espace  $S_c(x_1, \nu_{\max})$  défini par :

$$S_c(x_1, \nu_{\max}) = \left\{ (\nu_x, \nu) \text{ tel que } |\nu_x| < \frac{2}{x_1}, |\nu| < \nu_{\max} \right\} \quad (2.11)$$

où  $\nu_{\max} = \frac{2}{T_{\min}}$  avec  $T_{\min} = \min(T_i)$ ,  $i = 1, \dots, 3$ .

On connaît désormais le sous espace  $S_c$  contenant la majeure partie de l'énergie du clutter. Toutefois, avant de définir la bande atténuée du filtre comme étant le sous espace  $S_c$ , il nous faut étudier le spectre de la réponse d'une mine afin de s'assurer que les signatures des mines ne soient pas dégradées de façon significative par le filtrage.

### 2.2.2 Modélisation et analyse fréquentielle d'une hyperbole caractérisant la réponse d'une mine antipersonnel

La présence d'un objet enfoui dans le sol est caractérisée par une hyperbole sur une donnée Bscan. Une approche géométrique directe peut être utilisée dans le cas où le sol a une vitesse de propagation  $v_c$  constante (i.e. pour un sol homogène). Pour un objet ponctuel, enfoui à une profondeur  $z_0$  et positionné en  $x = x_0$ , le signal réfléchi par l'objet sera centré à l'instant :

$$t = t_0 + \frac{2}{v} \sqrt{(x - x_0)^2 + z_0^2} \quad (2.12)$$

qui dépend de la vitesse  $v$  de propagation du pulse émis par le radar dans le sol et de  $t_0$  le temps de réponse de l'interface air-sol. On suppose, que la distance entre le GPR et le sol est maintenue constante pendant les mesures et que l'interface air-sol est plate, ainsi  $t_0$  est supposé constant. Par conséquent, l'équation d'une hyperbole représentée sur un Bscan, voir figure 2.4, est :

$$\frac{(t - t_0)^2}{a^2} - \frac{(x - x_0)^2}{b^2} = 1 \quad (2.13)$$

avec  $a = \frac{2z_0}{v}$  et  $b = z_0$ .

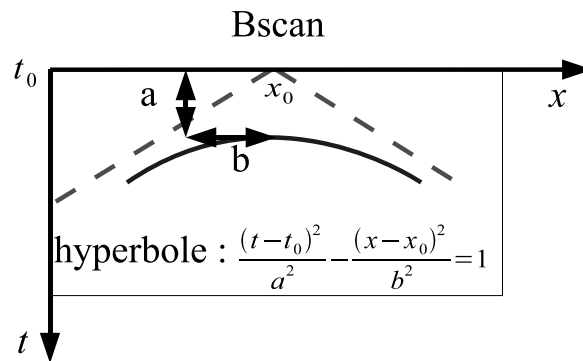


FIG. 2.4: Hyperbole modélisant la réponse d'un objet enfoui et ces asymptotes (lignes pointillées).

Ainsi, un Bscan contenant une seule hyperbole telle que celle définie par l'équation (2.13) peut être défini par la fonction  $I_s(x, t)$  suivante :

$$\begin{aligned} I_s(x, t) &= \delta(t - t_0 - a\sqrt{\frac{(x - x_0)^2}{b^2} + 1}) \text{ si } |x - x_0| \leq \Delta x \\ I_s(x, t) &= 0 \text{ sinon} \end{aligned} \quad (2.14)$$

avec  $\delta(t - \alpha)$  la distribution de dirac en  $t = \alpha$ . La directivité de l'antenne étant finie, le signal réfléchi ne peut être mesuré que pour des points peu éloignés de  $x_0$ . La largeur d'une

telle hyperbole est égale à  $2\Delta x$ . Dans le cadre de la détection de mines antipersonnel  $\Delta x$  est de l'ordre d'une dizaine de centimètres. La représentation spectrale d'une mine enfouie est obtenue en prenant la transformée de Fourier, il vient :

$$I_s(\nu_x, \nu) = e^{-2i\pi t_0 \nu} \int_{x_0 - \Delta x}^{x_0 + \Delta x} e^{-2i\pi \nu a \sqrt{\frac{(x-x_0)^2}{b^2} + 1}} e^{-2i\pi x \nu_x} dx$$

En utilisant un changement de variable, le spectre précédent peut également s'écrire :

$$I_s(\nu_x, \nu) = e^{-2i\pi(x_0 \nu_x + t_0 \nu)} \int_{-\Delta x}^{\Delta x} e^{-2i\pi \nu a \sqrt{\frac{x^2}{b^2} + 1}} e^{-2i\pi x \nu_x} dx \quad (2.15)$$

Dans le cas où  $|\frac{x}{b}|$  est petit devant 1, on peut faire l'approximation suivante :

$$\sqrt{\frac{x^2}{b^2} + 1} \simeq 1 \quad (2.16)$$

Ainsi pour des mines enfouies à des profondeurs  $z_0$  telles que  $z_0 > \Delta x$  ( $z_0 = b$ ), le spectre de l'hyperbole peut être approximé par :

$$I_s(\nu_x, \nu) \simeq e^{-2i\pi(x_0 \nu_x + (t_0 + a)\nu)} \int_{-\Delta x}^{\Delta x} e^{-2i\pi x \nu_x} dx \quad (2.17)$$

$$I_s(\nu_x, \nu) \simeq 2\Delta x e^{-2i\pi(x_0 \nu_x + (t_0 + a)\nu)} \text{sinc}(2\pi \Delta x \nu_x) \quad (2.18)$$

Le spectre d'amplitude approché est donné par :

$$|I_s(\nu_x, \nu)| \simeq 2\Delta x |\text{sinc}(2\pi \Delta x \nu_x)| \quad (2.19)$$

Ainsi le module du spectre approché du signal provenant d'une mine est indépendant de la fréquence  $\nu$  et l'énergie principale du signal est localisée dans l'intervalle  $\nu_x \in [\frac{-1}{\Delta x}, \frac{1}{\Delta x}]$ . Sur le Bscan de la figure 2.1, l'hyperbole de largeur  $\Delta x = 0.1\text{m}$ , centrée en  $x = 0.2\text{m}$ , caractérise la présence d'une mine antipersonnel. L'énergie principale du spectre approché de cette mine est alors située dans l'intervalle  $\nu_x \in [-20, 20]$ . La figure 2.5, représente l'évolution du spectre approché de l'hyperbole pour  $\nu = 0$ .

Il est maintenant possible de comparer le spectre d'une bande de clutter avec celui d'une hyperbole modélisant la réponse d'une mine. On considère la première bande de clutter du Bscan de la figure 2.1 dont l'énergie principale est située dans le sous espace  $S_c$  défini par (2.7). En regardant les spectres normalisés du clutter et de l'hyperbole ainsi modélisés pour  $\nu = 0$ , représentés figure 2.6, on peut voir que l'étalement du spectre du clutter suivant  $\nu_x$  est petit en comparaison de celui d'une hyperbole. En effet, l'énergie principale d'une bande horizontale modélisant le clutter est située dans une bande de largeur égale à  $2 \text{ m}^{-1}$  tandis que celle d'une hyperbole modélisant la réponse d'une mine est située dans une bande de largeur égale à  $20 \text{ m}^{-1}$ . Ainsi, l'utilisation d'un filtre numérique de type passe haut pour filtrer le clutter, avec une bande de transition étroite, ne doit pas dégrader significativement les signaux provenant d'objets enfouis,

voir figure 2.6. Puisque le spectre approché de la réponse d'une mine ne dépend pas de  $\nu$ , on peut filtrer le clutter pour toutes les fréquences  $\nu$ . La bande atténuée  $S$  du filtre est alors définie par :

$$S = \left\{ (\nu_x, \nu) \mid |\nu_x| \in \left[0, \frac{2}{x_1}\right], \forall \nu \right\} \quad (2.20)$$

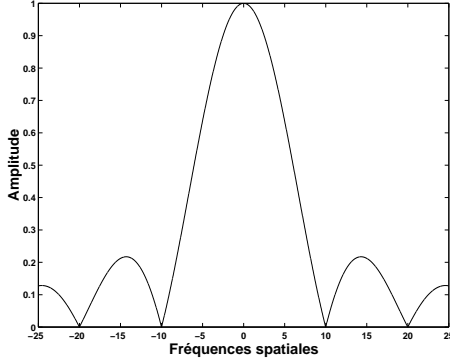


FIG. 2.5: Spectre d'amplitude approché d'une hyperbole modélisant la réponse d'une mine pour  $|\Delta_x| < z_0$  et  $\nu = 0$ .

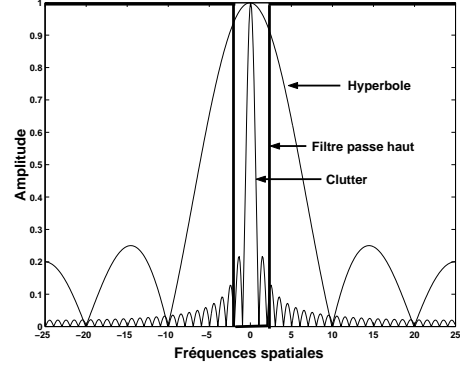


FIG. 2.6: Spectres d'amplitude approchés du clutter, d'une hyperbole et du filtre numérique pour  $\nu = 0$ .

Cependant, pour des mines enfouies à faibles profondeurs (1-5 cm), l'approximation faite pour la relation (2.16) n'est plus valable pour différentes valeurs de  $b$  et  $x$  considérées. Il est par conséquent difficile de trouver une approximation pour le spectre de l'hyperbole, défini par l'équation (2.15). En observant plusieurs Bscans réels de notre base de données, tel que celui représenté sur la figure 2.1, on peut voir que la courbure du sommet de l'hyperbole est faible. De plus, la directivité des antennes du GPR étant finie, on peut également voir que les branches de l'hyperbole sont de longueurs courtes et quasiment symétriques. Une hyperbole sur un Bscan peut par conséquent être approximée par trois segments de droites. Le sommet de l'hyperbole est modélisé par un segment de droite de pente nulle dont la taille est directement liée à la taille de l'objet enfoui. Les branches de l'hyperbole sont modélisées par deux segments de droites symétriques de pente  $\pm a_h$ , voir figure 2.7. Un Bscan contenant une hyperbole, tel que celui représenté figure 2.4, peut donc être modélisé approximativement par la fonction  $I_m(x, t)$ , représentée figure 2.7, définie de la façon suivante :

$$\begin{aligned} I_m(x, t) &= A \text{ si } t = a_h(x - x_0) + t_0 \text{ avec } x \in [x_2, x_3] \subset [0, x_1] \\ &= A \text{ si } t = a + t_0 \text{ avec } x \in [x_3, x_4] \subset [0, x_1] \\ &= A \text{ si } t = -a_h(x - x_0) + t_0 \text{ avec } x \in [x_4, x_5] \subset [0, x_1] \\ &= 0 \text{ sinon} \end{aligned} \quad (2.21)$$

avec  $A$ ,  $x_0$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  et  $x_5$  des constantes réelles. Cette fonction peut également s'écrire de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
I_m(x, t) &= A\delta(t = a_h(x - x_0) + t_0) \quad \text{si } x \in [x_2, x_3] \\
&= A\delta(t = a + t_0) \quad \text{si } x \in [x_3, x_4] \\
&= A\delta(t = -a_h(x - x_0) + t_0) \quad \text{si } x \in [x_4, x_5] \\
&= 0 \quad \text{sinon}
\end{aligned} \tag{2.22}$$

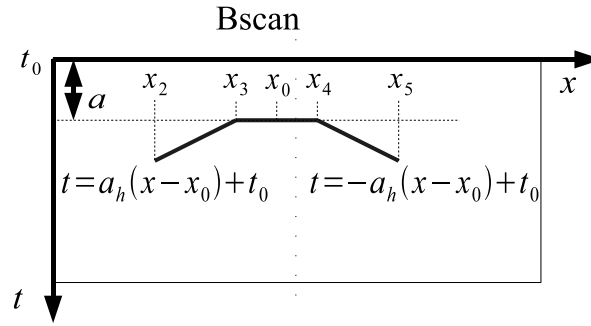


FIG. 2.7: Modélisation de l'hyperbole de la figure 2.4 par 3 segments de droites.

Les trois segments de droites modélisant l'hyperbole n'étant pas définis sur le même support, la transformée de Fourier continue à deux dimensions de la fonction  $I_m(x, t)$ , notée  $I_m(\nu_x, \nu)$ , peut s'écrire comme la somme des transformées de chaque segment :

$$I_m(\nu_x, \nu) = I_{m_1}(\nu_x, \nu) + I_{m_2}(\nu_x, \nu) + I_{m_3}(\nu_x, \nu) \tag{2.23}$$

avec :

$$I_{m_1}(\nu_x, \nu) = e^{-2i\pi\nu t_0} \int_{x_2}^{x_3} A e^{-2i\pi\nu a_h(x-x_0)} e^{-2i\pi\nu_x x} dx \tag{2.24}$$

$$I_{m_2}(\nu_x, \nu) = e^{-2i\pi\nu(a+t_0)} \int_{x=x_3}^{x_4} A e^{-2i\pi\nu_x x} dx \tag{2.25}$$

$$I_{m_3}(\nu_x, \nu) = e^{-2i\pi\nu t_0} \int_{x=x_4}^{x_5} A e^{2i\pi\nu a_h(x-x_0)} e^{-2i\pi\nu_x x} dx \tag{2.26}$$

La transformée de Fourier 2D, pour le segment de droite de pente nulle, modélisant le sommet de l'hyperbole s'écrit :

$$I_{m_2}(\nu_x, \nu) = A(x_4 - x_3) e^{-2i\pi\nu(a+t_0)} e^{-i\pi\nu_x(x_3+x_4)} \text{sinc}(\pi\nu_x(x_4 - x_3)) \tag{2.27}$$

Le spectre d'amplitude du sommet de l'hyperbole, représenté figure 2.7, est donné par la relation suivante :

$$|I_{m_2}(\nu_x, \nu)| = |A\Delta_s \operatorname{sinc}(\pi\nu_x\Delta_s)| \quad (2.28)$$

avec  $\Delta_s = x_4 - x_3$ . La largeur du sommet de l'hyperbole apparaissant sur une donnée Bscan est directement liée à la taille de l'objet enfoui, dans le cadre de la détection de mines antipersonnel,  $|\Delta_s|$  est de l'ordre d'une dizaine de centimètres ( $|\Delta_s| = 10\text{cm}$ ). Par conséquent, comme le montre la figure 2.8, l'énergie principale de  $|I_{m_2}(\nu_x, \nu)|$  est située à l'intérieur du sous espace  $S_2 = \{(\nu_x, \nu) \text{ tel que } |\nu_x| \in [0, 20], \forall \nu\}$ . Puisque le spectre d'amplitude du sommet de l'hyperbole est indépendant de la fréquence temporelle  $\nu$ , une comparaison avec le spectre d'amplitude du clutter peut être réalisée à  $\nu = 0$ . Grâce à la figure 2.9, on peut voir que l'étalement du spectre du clutter suivant l'axe  $\nu_x$  est dix fois plus petit que celui du spectre du sommet de l'hyperbole. Ainsi, un filtre passe haut, conçu pour éliminer le clutter à l'intérieur du sous espace  $S$ , défini par (2.20), peut être utilisé. En effet, l'opération de filtrage ne devrait pas apporter de distortions significatives au sommet de l'hyperbole.

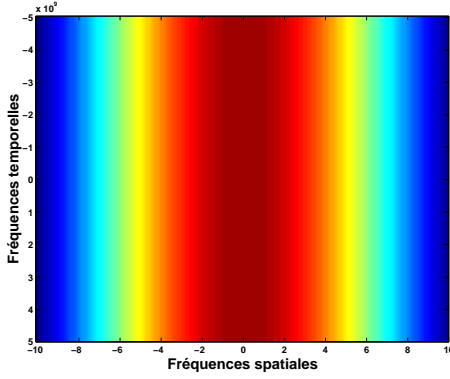


FIG. 2.8: Spectre d'amplitude d'un segment de droite modélisant le sommet d'une hyperbole pour  $|\Delta_s| = 10$  cm.

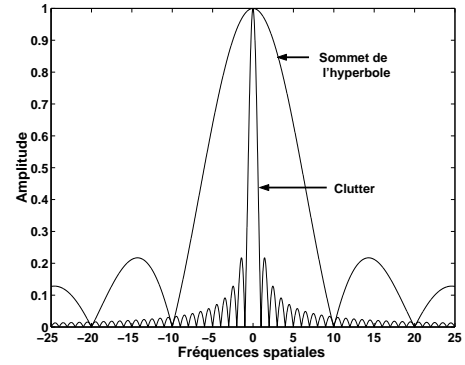


FIG. 2.9: Spectres d'amplitude normalisés du clutter et du sommet de l'hyperbole pour  $\nu = 0$  ( $x_1 = 1\text{m}$ ,  $|\Delta_s| = 10\text{cm}$ ).

Le spectre d'amplitude du segment de droite de pente  $a_h$  modélisant une branche d'hyperbole est donné par :

$$|I_{m_1}(\nu_x, \nu)| = |A\Delta_b \operatorname{sinc}(\pi(a_h\nu + \nu_x)\Delta_b)| \quad (2.29)$$

avec  $\Delta_b = x_3 - x_2$ , tandis que le segment de droite de pente  $-a_h$  modélisant la seconde branche de l'hyperbole, défini par (2.22), admet le spectre d'amplitude suivant :

$$|I_{m_3}(\nu_x, \nu)| = |A\Delta_b \operatorname{sinc}(\pi(-a_h\nu + \nu_x)\Delta_b)| \quad (2.30)$$

avec  $\Delta_b = x_5 - x_4$  (On suppose que les segments de droite modélisant les deux branches de l'hyperbole sont de même longueur.).  $\Delta_b$  est de l'ordre de 8-12 cm pour les données Bscan réelles de la campagne MACADAM. L'énergie principale des spectres d'amplitudes  $|I_{m_1}(\nu_x, \nu)|$  et  $|I_{m_3}(\nu_x, \nu)|$  est située à l'intérieur des deux premiers lobes des fonc-

tions sinus cardinal. Les spectres d'amplitude de deux segments de droite modélisant les branches de l'hyperbole, avec pour paramètres  $|\Delta_b| = 10$  cm et  $|a_h| = 1$ , sont représentés sur les figures 2.10 et 2.11. On peut noter que  $a_h$  dépend de la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dans le sol ( $a_h = \frac{b}{a} = \frac{v}{2}$ ).

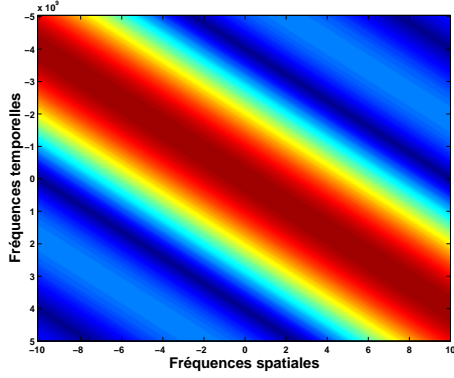


FIG. 2.10: Spectre d'amplitude d'un segment de droite de pente  $a_h$ .

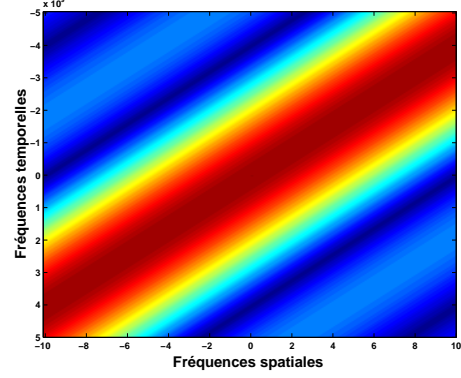


FIG. 2.11: Spectre d'amplitude d'un segment de droite de pente  $-a_h$ .

Il est ensuite important de remarquer que l'intersection entre les spectres d'amplitude approchés du clutter et des branches de l'hyperbole est maximale pour  $\nu = 0$ , voir figures 2.12 et 2.13. Le spectre d'amplitude approché d'une branche d'hyperbole est beaucoup plus étalé que celui du clutter. Par conséquent, les composantes fréquentielles du spectre d'une donnée Bscan située à l'intérieur du sous espace  $S$  peuvent être éliminées par le filtrage sans pour autant apporter des dégradations importantes sur les branches de l'hyperbole. Cette dégradation sera maximale pour  $\nu = 0$ .

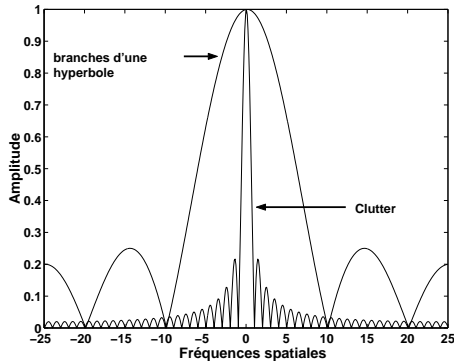


FIG. 2.12: Spectres d'amplitude approchés du clutter et des segments de droite modélisant les branches d'une hyperbole pour  $\nu = 0$ .

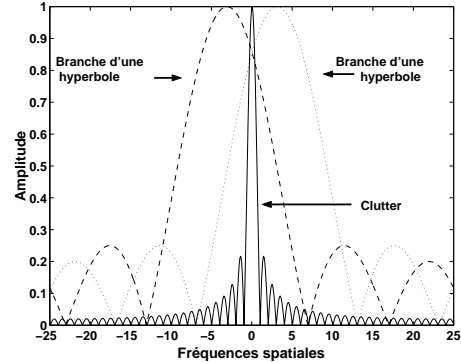


FIG. 2.13: Spectres d'amplitude approchés du clutter et des segments de droite modélisant les branches d'une hyperbole pour  $\nu \neq 0$ .

L'analyse fréquentielle des modèles géométriques du clutter et des signaux provenant des mines, montre que l'utilisation d'un filtre passe haut avec une bande de transition

étroite, dont la bande atténuée est définie par (2.20), doit permettre de réduire significativement le clutter tout en protégeant les signatures hyperboliques des objets enfouis. En réalité, quelque soit la profondeur à laquelle une mine est enfouie, il faut juste vérifier que la largeur de la signature de la mine apparaissant sur la donnée Bscan à prétraiter soit petite devant la largeur  $x_1$  de ce Bscan. Cette condition est en effet suffisante pour garantir que l'étalement du spectre du clutter soit petit devant celui de l'objet enfoui. Dans le paragraphe suivant on s'intéresse à la conception et à l'implémentation du filtre.

### 2.2.3 Synthèse du filtre RIF adapté aux données Bscan

#### 2.2.3.1 Spécification du filtre dans le domaine fréquentiel

On souhaite synthétiser un filtre RIF (Filtre à Réponse Impulsionnelle Finie) de type passe-haut adapté aux données Bscan. Pour cela, on peut utiliser la modélisation et l'analyse précédente afin de construire le gabarit du filtre qui contient la réponse fréquentielle du filtre désirée, notée  $H(\nu_x, \nu)$ . Celle-ci est définie de la manière suivante :

$$\begin{cases} H(\nu_x, \nu) = 0 & (\nu_x, \nu) \in S \\ H(\nu_x, \nu) = 1 & (\nu_x, \nu) \notin S \end{cases} \quad (2.31)$$

où  $S$  est le domaine défini précédemment :

$$S = \left\{ (\nu_x, \nu) \mid |\nu_x| \in \left[0, \frac{2}{x_1}\right], \forall \nu \right\} \quad (2.32)$$

En prenant la transformée de Fourier inverse, on peut obtenir facilement la réponse impulsionnelle du filtre  $h(x, t)$ . Cependant l'image étant échantillonnée suivant  $x$  et  $t$ , il est nécessaire de définir le filtre numérique équivalent. Ceci peut être réalisé en utilisant une transformation bilinéaire, dont un rappel est donné dans l'annexe D.2.

La réponse en fréquence du filtre numérique idéal, notée  $H_d(\nu_{xn}, \nu_n)$ , est ainsi définie par :

$$\begin{cases} H_d(\nu_{xn}, \nu_n) = 0 & (\nu_{xn}, \nu_n) \in S_d \\ H_d(\nu_{xn}, \nu_n) = 1 & (\nu_{xn}, \nu_n) \notin S_d \end{cases} \quad (2.33)$$

où  $\nu_{xn}$  est la fréquence spatiale numérique, telle que  $|\nu_{xn}| \in \left[0, \frac{\nu_{xs}}{2}\right]$ , avec  $\nu_{xs}$  la fréquence d'échantillonnage suivant  $x$ .  $\nu_n$  est la fréquence temporelle numérique, telle que  $|\nu_n| \in \left[0, \frac{\nu_s}{2}\right]$ , avec  $\nu_s$  la fréquence d'échantillonnage suivant  $t$ . Le domaine  $S_d$  est défini par :

$$S_d = \left\{ (\nu_{xn}, \nu_n) \mid |\nu_{xn}| \in [0, \alpha_x] \text{ et } |\nu_n| \in \left[0, \frac{\nu_s}{2}\right] \right\} \quad (2.34)$$

où

$$\alpha_x = \frac{\nu_{xs}}{\pi} \arctan\left(\frac{2\pi}{x_1 \nu_{xs}}\right) \quad (2.35)$$

La figure 2.14 représente la réponse fréquentielle du filtre idéal.

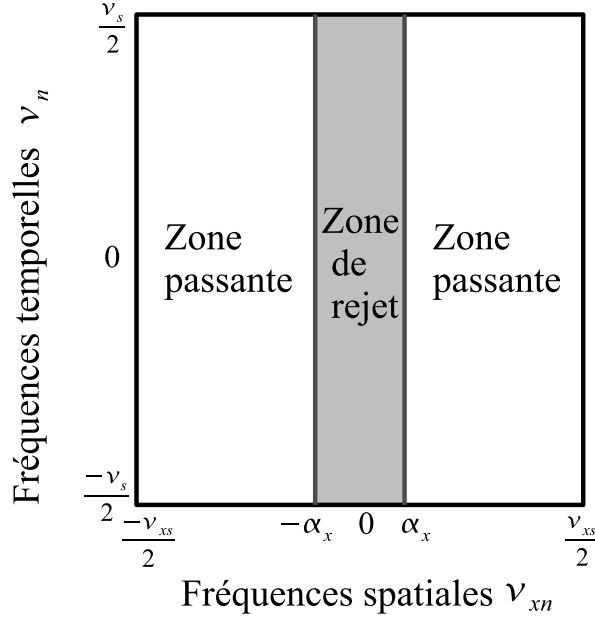


FIG. 2.14: Gabarit du filtre passe haut numérique adapté aux Bscans.

### 2.2.3.2 Réponse impulsionnelle du filtre

En utilisant une transformée de fourier discrète inverse il est possible de calculer la réponse impulsionnelle  $h(m, n)$  du filtre numérique défini à partir de (2.33) :

$$h(m, n) = \delta(m, n) - \frac{2\alpha_x}{\nu_{xs}} \text{sinc}\left(\frac{2\pi m \alpha_x}{\nu_{xs}}\right) \text{sinc}(\pi n) \quad (2.36)$$

Cette réponse est à support infini, comme on ne peut réaliser que des filtres à support fini, il faut tronquer la réponse impulsionnelle. La troncature de la réponse impulsionnelle peut être réalisée par différents types de fenêtres (rectangulaire, hanning,  $\dots$ ). Soit  $w(m, n)$  la fenêtre bidimensionnelle utilisée pour la troncature, l'expression du filtre après fenêtrage est :

$$\begin{cases} h_f(m, n) = h(m, n)w(m, n) & \text{si } m \in [0, M - 1] \text{ et } n \in [0, N - 1] \\ h_f(m, n) = 0 & \text{si } m \notin [0, M - 1] \text{ et } n \notin [0, N - 1] \end{cases} \quad (2.37)$$

avec  $M$  le nombre d'échantillons de la fenêtre suivant  $x$  et  $N$  le nombre d'échantillons suivant  $t$ . En conséquence, la réponse en fréquence du filtre réellement déterminée, dénotée  $H_{df}(\nu_{xn}, \nu_n)$ , est obtenue en prenant le produit de convolution entre la réponse en fréquence idéale du filtre  $H_d(\nu_{xn}, \nu_n)$  et la réponse en fréquence de la fenêtre, notée  $W(\nu_{xn}, \nu_n)$  :

$$H_{df}(\nu_{xn}, \nu_n) = H_d(\nu_{xn}, \nu_n) * W(\nu_{xn}, \nu_n) \quad (2.38)$$

### 2.2.3.3 Réglage des paramètres du filtre

Les paramètres du filtre sont  $x_1$ ,  $\nu_{xs}$ ,  $\nu_s$ ,  $M$  et  $N$ . Le paramètre  $x_1$  correspond à la distance parcourue par le GPR pour former la donnée Bscan. Les fréquences d'échantillonnage spatiale et temporelle, respectivement  $\nu_{xs}$  et  $\nu_s$ , sont des paramètres propres au radar utilisé et sont donc connues. La taille du filtre est identique à celle de la fenêtre. Par conséquent, les nombres de coefficients  $M$  et  $N$  du filtre sont respectivement égaux aux nombres d'échantillons spatiaux et temporels de la fenêtre utilisée pour tronquer la réponse impulsionnelle.

Les différentes fenêtres pouvant être utilisées pour la troncature de la réponse impulsionnelle du filtre peuvent être caractérisées par deux paramètres. Le premier est la largeur du pic principal de leur transformée de Fourier, qui détermine la largeur de la bande de transition du filtre. Le deuxième paramètre est l'atténuation dans la bande coupée, exprimée en décibels. Le tableau 2.1, issu de [DQ96], fournit les principales caractéristiques de quelques fenêtres couramment utilisés pour la synthèse de filtre numérique.

Nom	Equation $\forall n \in [0 \cdots N_w - 1]$	Largeur de la bande de transition en fréquence réduite $\frac{f}{f_s}$	Atténuation du filtre en bande coupée
Rectangulaire	$w(n) = 1$	$2/N_w$	21dB
hanning	$w(n) = \frac{1 - \cos(\frac{2\pi n}{N_w - 1})}{2}$	$4/N_w$	44dB
Blackman	$w(n) = 0.42 - 0.5 \cos(\frac{2\pi n}{N_w - 1}) + 0.08 \cos(\frac{4\pi n}{N_w - 1})$	$6/N_w$	74dB

TAB. 2.1: Différents types de fenêtre et leurs caractéristiques

On peut voir que la largeur de la bande de transition est directement liée à la taille de la fenêtre puisqu'elle dépend de son nombre d'échantillons  $N_w$ . Par conséquent plus l'ordre du filtre  $N_w$  est grand plus la bande de transition est étroite. Dans le cadre de la synthèse de notre filtre adapté aux données Bscan on souhaite avoir une bande de transition étroite de sorte à éliminer la majorité du clutter sans toutefois distordre la signature des mines enfouies. La fenêtre rectangulaire est celle qui permet d'obtenir la bande de transition la plus étroite cependant les lobes secondaires de son spectre sont à l'origine d'oscillations indésirables dans la bande passante et dans la bande coupée. On utilise par conséquent une fenêtre bidimensionnelle de hanning pour tronquer la réponse impulsionnelle de notre filtre. La réponse impulsionnelle réelle est :

$$h_f(m, n) = h(m, n) \frac{(1 - \cos(\frac{2\pi n}{N-1}))(1 - \cos(\frac{2\pi m}{M-1}))}{4} \quad (2.39)$$

avec  $m \in [0, M - 1]$  et  $n \in [0, N - 1]$ .

Il reste maintenant à déterminer l'ordre du filtre. La réponse en fréquence du filtre réel est obtenue en prenant le produit de convolution entre la réponse en fréquence du filtre idéal et la réponse en fréquence d'une fenêtre de hanning bidimensionnelle. Il faut que le produit de convolution soit nul dans le domaine  $S_d$  si l'on veut éliminer la majeure partie du clutter, voir figure 2.14. Pour cela il faut que la largeur de la fenêtre de hanning suivant l'axe  $\nu_x$ , notée  $L_{hx}$ , soit strictement inférieure à  $2\alpha_x$  et que la largeur de la fenêtre suivant l'axe  $\nu$ , notée  $L_h$ , soit strictement inférieure à  $\nu_s$ . La largeur du spectre d'une fenêtre de hanning en fréquence réduite étant égale à  $\frac{4}{N_w}$  avec  $N_w$  le nombre d'échantillons de la fenêtre, on a :  $L_{hx} = \frac{4}{M}$  et  $L_h = \frac{4}{N}$ . Pour des fréquences réduites, il faut choisir  $M$  et  $N$  de la façon suivante :

$$L_{hx} = \frac{4}{M} < \frac{2\alpha_x}{\nu_{xs}} \implies M > \frac{2\nu_{xs}}{\alpha_x} \quad (2.40)$$

$$L_h = \frac{4}{N} < \frac{\nu_s}{\nu_s} \implies N > 4 \quad (2.41)$$

De plus, les nombres de coefficients du filtre  $M$  et  $N$  doivent être choisis impairs de sorte que le filtre soit symétrique par rapport à l'origine. Par conséquent,  $N$  peut être choisi égal à 5 tandis que  $M$  est le nombre impair le plus proche vérifiant la relation (2.40). En effet, on choisit de sélectionner  $M$  de sorte que la taille du filtre soit la plus petite possible afin de garantir un faible coût de calcul. Cependant, si l'on souhaite obtenir une bande de transition plus étroite pour le filtre il est possible de choisir une valeur de  $M$  significativement supérieur à  $\frac{2\nu_{xs}}{\alpha_x}$ .

Ainsi, connaissant la distance  $x_1$  et la fréquence d'échantillonnage spatiale  $\nu_{xs}$ , l'ordre du filtre ( $M, N$ ) peut être automatiquement déterminé en utilisant les relations (2.35), (2.40) et (2.41). Par exemple, les spectres d'amplitude du filtre idéal et du filtre réel conçus pour éliminer le clutter enregistré sur la donnée Bscan de la figure 2.1, sont représentés respectivement sur les figures 2.15 et 2.16. Les paramètres du filtre sont :  $x_1 = 1\text{m}$  et  $\nu_{xs} = 50\text{ m}^{-1}$ . Les valeurs  $M = 51$  et  $N = 5$  ont été choisies pour l'ordre du filtre.

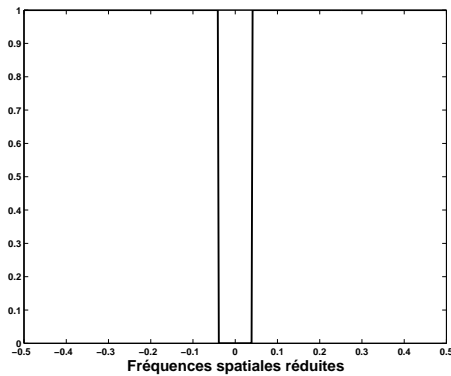


FIG. 2.15: Spectre d'amplitude du filtre idéal pour  $\nu = 0$ .

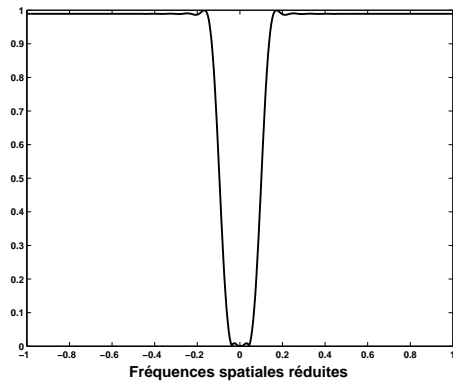


FIG. 2.16: Spectre d'amplitude du filtre réel pour  $\nu = 0$ .

## 2.2.4 Simulations

Le filtre passe haut numérique, défini par la relation (2.38), est appliqué sur des données Bscans synthétiques et réelles, afin de tester sa capacité à éliminer le clutter sur des Bscans tout en protégeant les signatures hyperboliques des mines.

### 2.2.4.1 Données synthétiques

Le filtre est appliqué au Bscan synthétique, représenté figure 2.17. Cette donnée est constituée d'une bande horizontale qui modélise le clutter et de trois segments de droite qui modélisent la signature d'une mine enfouie à faible profondeur comme décrit dans le paragraphe 2.2.2. La longueur de la bande horizontale  $x_1$  est égale à 1 m. Les pentes des segments de droites modélisant les branches de l'hyperbole sont respectivement égales à 1 et -1 avec  $\Delta_b = 10$  cm. Le sommet de l'hyperbole est de longueur  $\Delta_s = 10$  cm. L'amplitude du clutter est trois fois plus grande que l'amplitude de la réponse de la mine. La fréquence d'échantillonnage spatiale est  $\nu_{xs} = 50 \text{ m}^{-1}$ . Ainsi, le filtre passe haut numérique idéal  $H_d(\nu_{xn}, \nu_n)$  est défini par :

$$\begin{cases} H_d(\nu_{xn}, \nu_n) = 0, & (\nu_{xn}, \nu_n) \in S_d \\ H_d(\nu_{xn}, \nu_n) = 1, & (\nu_{xn}, \nu_n) \notin S_d \end{cases} \quad (2.42)$$

avec  $S_d = \{(\nu_{xn}, \nu_n) \mid |\nu_{xn}| \in [0, 1.98], |\nu_n| \in [0, 25]\}$ . Les valeurs  $N = 5$  et  $M = 51$  sont choisies pour l'ordre du filtre. La donnée filtrée est représentée figure 2.18. Grâce au filtrage, le clutter a été significativement réduit, tandis que la signature de la mine n'a pas subi de dégradation majeure. La réponse de la mine est désormais prédominante dans la donnée Bscan filtrée.

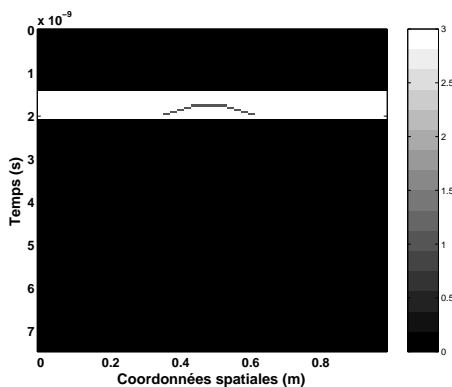


FIG. 2.17: Donnée synthétique représentant un modèle géométrique d'une donnée Bscan.

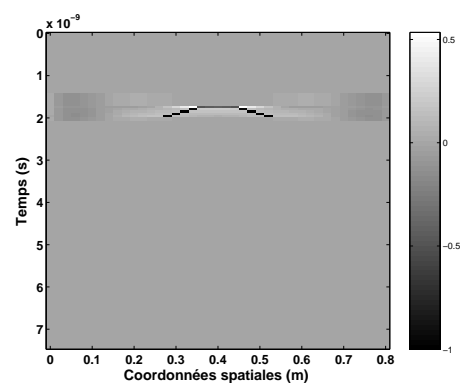


FIG. 2.18: Donnée synthétique de la figure 2.17 après filtrage. L'amplitude a été normalisée.

Bien sûr, ce résultat était attendu puisque le filtre a été conçu à partir d'une analyse fréquentielle d'une donnée Bscan ainsi modélisée (voir paragraphe 2.2.2). Une donnée

Bscan simulée plus réaliste, où les signatures des mines sont des hyperboles est considérée afin de voir si le modèle géométrique utilisé pour l'analyse fréquentielle du spectre de l'hyperbole est valide, voir figure 2.19. La méthode split step 2D présentée dans [BG98] a été utilisée pour créer ce Bscan. Un pulse électromagnétique, modélisé par une fonction gaussienne, a été envoyé à une hauteur de 12cm au dessus d'un sol homogène dans lequel deux objets ont été enfouis. La fréquence centrale du spectre du pulse est de 900 MHz. Pour appliquer la méthode split step, la permittivité diélectrique ( $\varepsilon_r$ ) et le facteur de qualité ( $Q$ ) du sol et des objets doivent être connus. Le couplage entre les antennes émettrice et réceptrice du GPR n'est pas pris en considération. Les paramètres de la simulation sont donnés dans le tableau 2.3.

TAB. 2.2: Paramètres de simulation

	Objet 1	Objet 2	sol
$(\varepsilon_r, Q)$	(3,13.5)	(3,13.5)	(10,30)
Coordonnées spatiales	{0.84,0.96}	{2.3,2.45}	-
Profondeur	2 cm	5 cm	-

Pour concevoir le filtre adapté à cette donnée Bscan, les paramètres du filtre  $x_1$ ,  $M$  et  $N$  doivent être déterminés. La largeur du Bscan  $x_1$  est égale à 3.78 m et la fréquence d'échantillonnage spatiale  $\nu_{xs}$  est égale à  $33.3 m^{-1}$ . Ainsi, les valeurs  $N = 5$  et  $M = 129$  déterminent l'ordre du filtre. La bande atténuée du filtre est donnée par :  $S_d = \{(\nu_{xn}, \nu_n) \mid |\nu_{xn}| \in [0, 0.52], |\nu_n| \in [0, 16.6]\}$ . La figure 2.20 montre le résultat du filtrage. On peut observer que le clutter a été entièrement éliminé tandis que les objets enfouis sont toujours représentés par des hyperboles.

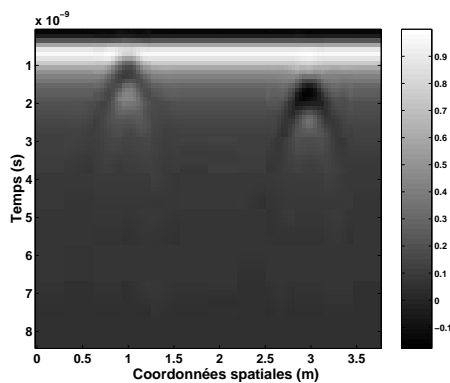


FIG. 2.19: Donnée Bscan simulée par la méthode split step.

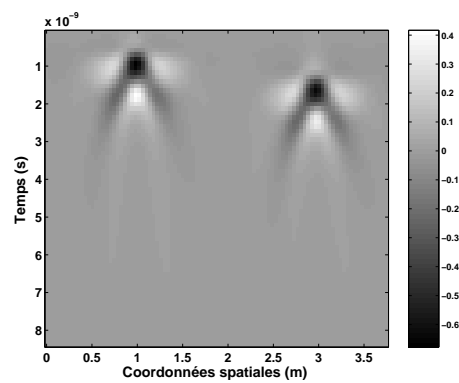


FIG. 2.20: Donnée Bscan simulée de la figure 2.19 après filtrage.

Sur les données Bscan des figures 2.17 et 2.19, le clutter est représenté sur les Bscans par une bande parfaitement horizontale. Cela signifie que la surface du sol est plane et que le radar est resté à une hauteur constante au dessus du sol, lors des mesures. Un

dernier exemple, nous permet d'étudier le cas où la surface du sol est rugueuse. Le Bscan de la figure 2.21 est créé grâce à la méthode split step. Un pulse électromagnétique, modélisé par une fonction gaussienne, a été envoyé au dessus d'un sol homogène dans lequel deux objets ont été enfouis. La surface du sol est une variable aléatoire centrée en  $z = 0$  est de variance égale à 5 cm. Les paramètres de simulations sont données dans le tableau suivant :

TAB. 2.3: Paramètres de simulation

	Objet 1	Objet 2	sol
$(\varepsilon_r, Q)$	(10,5000)	(10,5000)	(3,60)
Coordonnées spatiales	{1.2,1.5}	{2.9,3.2}	-
Profondeur	5 cm	10 cm	aléatoire

La figure 2.22 montre le résultat de l'opération de filtrage. On peut voir que le clutter a été en grande partie éliminé par le filtrage mais qu'il reste cependant des résidus de clutter. Dans une image, les basses fréquences correspondent à des variations lentes de l'intensité (zones uniformes) et les hautes fréquences à des variations rapides (contours). Ainsi, un filtre passe haut va de manière générale accentuer les contours et éliminer les zones uniformes. Ainsi, pour des bandes de clutter non horizontales, les contours des zones à fortes variations du clutter peuvent être à l'origine des résidus de clutter présents sur la figure 2.22. Les réponses des mines sont toutefois bien représentées après filtrage et leurs amplitudes sont supérieures à la majeure partie de celles des résidus de clutter. Le filtre conçu est donc robuste puisqu'il permet d'éliminer en grande partie le clutter même pour des sols dont la surface est rugueuse. Ce filtre est par conséquent adapté aux données Bscan et peut être testé sur des données réelles.

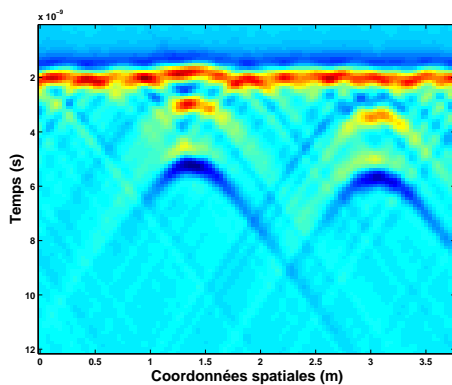


FIG. 2.21: Donnée Bscan simulée par la méthode split step.

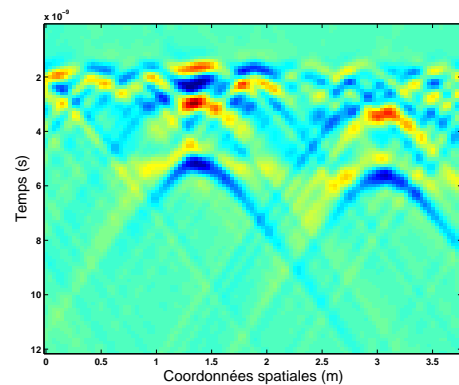


FIG. 2.22: Donnée Bscan simulée de la figure 2.19 après filtrage.

### 2.2.4.2 Données réelles

Les données Bscan réelles de la campagne MACADAM, décrites dans l'annexe B, sont utilisées pour tester le filtre numérique. Les trois Bscans réels sélectionnés, représentent les enregistrements d'un GPR au dessus de sols homogènes, dans lesquels différents types de mines antipersonnel ont été enfouies, à différentes profondeurs. Pour ces Bscans, les paramètres du filtre sont identiques, on a :  $x_1 = 1$  m,  $\nu_{xs} = 50$   $m^{-1}$ . Ainsi les valeurs  $M = 51$  et  $N = 5$  peuvent être choisies pour l'ordre du filtre. La bande atténuée du filtre est telle que :  $S_d = \{(\nu_{xn}, \nu_n) \mid |\nu_{xn}| \in [0, 1.98], |\nu_n| \in [0, 25]\}$ .

Considérons le Bscan de la figure 2.23. Sur cette image, deux réponses de mines antipersonnel de type MAUS1 (contenu métallique) sont visibles. L'une provient d'une mine enfouie à 5 cm et l'autre d'une mine posée sur la surface du sol. Le sol est une terre homogène recouverte d'herbe. La donnée Bscan filtrée est représentée figure 2.24. Les trois bandes horizontales représentant le clutter ont été éliminées tandis que les signatures des mines n'ont pas été dégradées de façon significative par le filtrage.

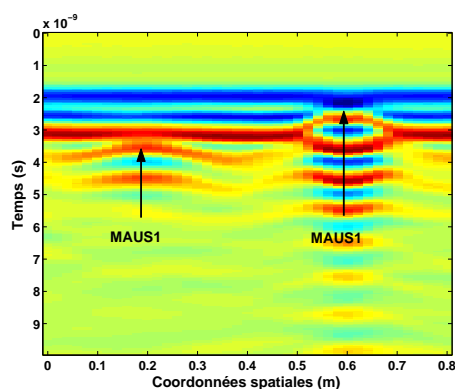


FIG. 2.23: Bscan enregistré au dessus d'une terre homogène recouverte d'herbe.

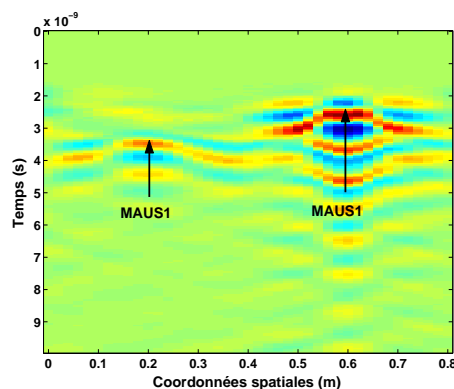


FIG. 2.24: Bscan de la figure 2.23 après filtrage ( $N = 5$ ,  $M = 51$ ).

Le filtre est maintenant testé sur le Bscan de la figure 2.25. Deux réponses de mines antipersonnel de type VSMK2 (mines plastiques) ont été enregistrées par le radar mais sont difficilement visibles puisque leurs réponses sont noyées dans le clutter. Comme le montre la figure 2.26, après filtrage le clutter est éliminé et les réponses des mines apparaissent clairement sur l'image.

Ces deux résultats de filtrage de données Bscan mettent en évidence la capacité de notre filtre à éliminer le clutter et à protéger les signatures des mines même lorsque celles-ci sont noyées dans le clutter. Sur ces deux données, le clutter est représenté sur les Bscans par des bandes parfaitement horizontales. Cela signifie que la surface du sol est plane et que le radar est resté à une hauteur constante au dessus du sol lors des mesures. Un dernier exemple, nous permet d'étudier le cas où les bandes de clutter ne sont pas parfaitement horizontales.

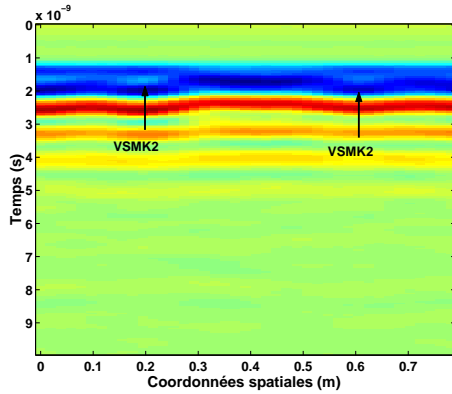


FIG. 2.25: Bscan enregistré au-dessus d'une terre homogène.

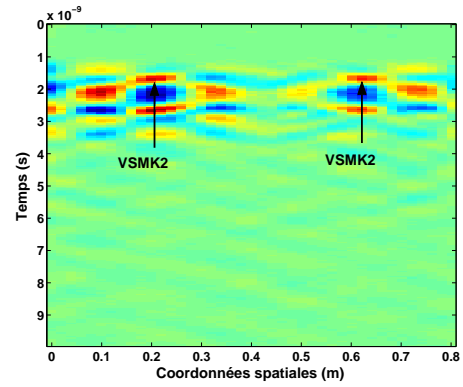


FIG. 2.26: Bscan de la figure 2.25 après filtrage ( $N = 5, M = 51$ ).

Sur le Bscan de la figure 2.27, les réponses provenant d'une mine MAUS1 enfouie à 10 cm de la surface du sol et d'une mine MAUS1 affleurante ont été enregistrées. La figure 2.28 montre le résultat de l'opération de filtrage. On peut voir que le clutter a été en grande partie éliminé par le filtrage mais qu'il reste cependant des résidus de clutter dans la partie centrale du Bscan. Ceux-ci proviennent des contours des bandes du clutter dans cette zone. On remarque en effet que dans cette zone les bandes du clutter ne sont pas horizontales, voir figure 2.27. Les réponses des mines sont toutefois bien représentées après filtrage et leurs amplitudes sont supérieures à la plupart de celles des résidus de clutter.

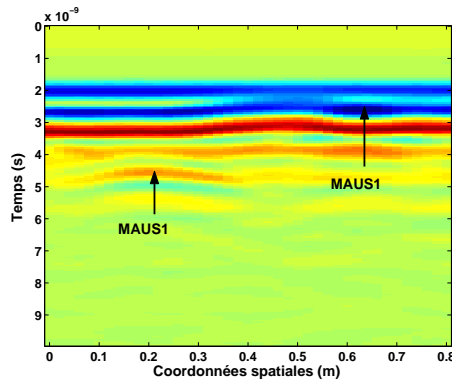


FIG. 2.27: Bscan enregistré au-dessus d'une terre homogène.

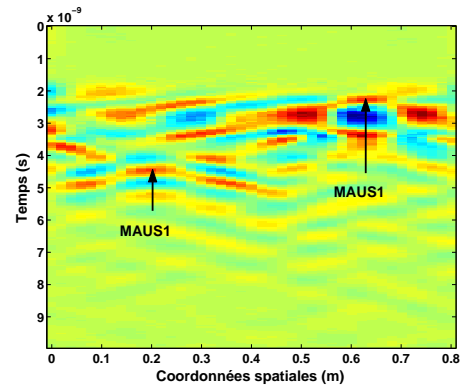


FIG. 2.28: Bscan de la figure 2.27 après filtrage ( $N = 5, M = 51$ ).

Dans le paragraphe suivant l'action de notre filtre sur les données Bscan est comparée à celle des filtres ACRC et des filtres de déclivité.

## 2.2.5 Evaluation des performances du filtre

Les performances du filtre conçu pour la réduction de clutter sur les données Bscan, dénommé filtre adapté, sont comparées à celles d'un filtre de déclivité passe haut d'ordre supérieur en  $k$  de fréquence de coupure  $\alpha = 0.1$  et d'ordre  $n = 2$  et d'un filtre ACRC pour différentes valeurs de  $N_w$ . Les fonctions de transfert de ces filtres sont définies respectivement par les équations (1.25) et (1.18). Les réponses fréquentielles des différents filtres sont représentées figures 2.29 et 2.30. On peut voir que les temps de réponses des filtres ACRC et du filtre de déclivité sont longs en comparaison de celui du filtre adapté. Les réponses fréquentielles des filtres ACRC et du filtre de déclivité sont plus éloignées de la réponse fréquentielle du filtre passe haut idéale comparativement à celle du filtre adapté. Concernant les filtres ACRC ceci s'explique par le fait que les coefficients de ces filtres ne sont pas optimisés par rapport aux spectres du clutter et des signatures de mines, voir paragraphe 1.3.2.2. Pour les filtres de déclivité, la réponse fréquentielle dépend du choix de la fréquence de coupure  $\alpha$ . Plus la valeur de  $\alpha$  est petite plus les pentes des courbes isogains délimitant la zone de rejet sont abruptes. Ici, la valeur de  $\alpha$  a été choisie de façon à ce que le clutter sur les données Bscan de la campagne MACADAM soit suffisamment réduit. On peut noter qu'il n'existe pas de méthode pour déterminer de façon optimale le choix de ce paramètre.

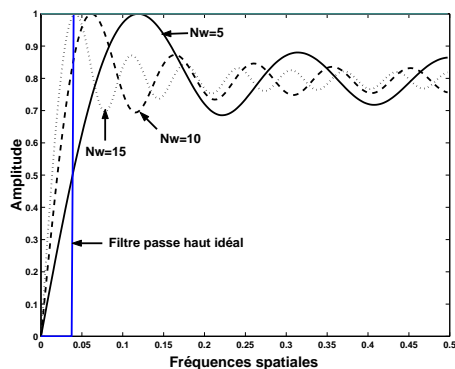


FIG. 2.29: Réponses fréquentielles d'un filtre ACRC pour  $N_w = 5, 10, 15$ .

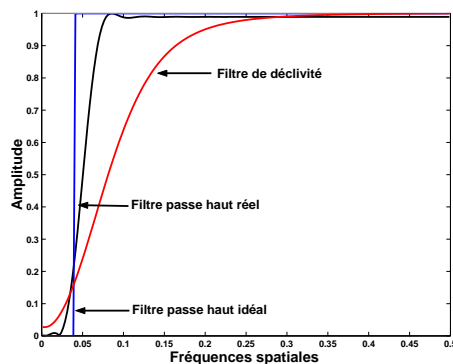


FIG. 2.30: Réponses fréquentielles du filtre de déclivité et du filtre adapté.

Les performances des différents filtres sont évaluées en terme de capacité à éliminer le clutter et de capacité à préserver les signaux provenant des mines. Ceci peut être réalisé grâce à la mesure du pourcentage de puissance du clutter, qui est éliminé par le filtrage, noté  $R_c$ , et grâce à une mesure du pourcentage de dégradation apporté par le filtrage au signal d'une mine. On mesure en réalité le pourcentage de dégradation apporté par le filtrage au sommet de l'hyperbole, noté  $R_s$ , et celui apporté aux branches de l'hyperbole, noté  $R_b$ . Ainsi, le meilleur filtre est celui qui garantit le meilleur compromis entre réduction de clutter et protection des signatures de mines. Ceci est équivalent à rechercher dans le cas idéal, le filtre pour lequel  $R_c$  est maximum tandis que  $R_s$  et  $R_b$  sont minimums.

Dans la partie 2.2, la signature d'une mine antipersonnel enfouie à faibles profondeurs a été modélisée par trois segments de droites dont les spectres d'amplitude correspondants sont définis par les relations (2.28), (2.29) et (2.30) tandis que le spectre d'amplitude approché du clutter est donné par la relation (2.5). Ainsi, le pourcentage de puissance de clutter qui est éliminé par le filtrage est mesuré de la façon suivante :

$$R_c = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |\text{sinc}(\pi x_1 \nu_x)|^2 |1 - H(\nu_x, 0)|^2 d\nu_x}{\int_{-\infty}^{\infty} |\text{sinc}(\pi x_1 \nu_x)|^2 d\nu_x} \quad 100 \quad (2.43)$$

où  $H(\nu_x, 0)$  est la réponse fréquentielle du filtre pour  $\nu = 0$ . Le pourcentage de dégradation apporté au sommet de l'hyperbole par le filtrage est défini par :

$$R_s = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |\text{sinc}(\pi \Delta_s \nu_x)|^2 |1 - H(\nu_x, 0)|^2 d\nu_x}{\int_{-\infty}^{\infty} |\text{sinc}(\pi \Delta_s \nu_x)|^2 d\nu_x} \quad 100 \quad (2.44)$$

tandis que le pourcentage de dégradation apporté aux branches de l'hyperbole est donné par :

$$R_b = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |\text{sinc}(\pi \Delta_b \nu_x)|^2 |1 - H(\nu_x, 0)|^2 d\nu_x}{\int_{-\infty}^{\infty} |\text{sinc}(\pi \Delta_b \nu_x)|^2 d\nu_x} \quad 100 \quad (2.45)$$

A partir de l'observation des données Bscans de la campagne MACADAM, les paramètres  $x_1$ ,  $\Delta_s$  et  $\Delta_b$  peuvent être choisis de la façon suivante :  $x_1 = 1$  m,  $\Delta_s = 10$  cm et  $\Delta_b = 8$  cm. Le tableau 2.4 donne les valeurs de  $R_c$ ,  $R_s$  et  $R_b$  pour le filtre adapté, le filtre de déclivité passe haut d'ordre deux et les filtres ACRC pour  $N_w = 5, 10, 15$ .

TAB. 2.4:  $R_c$ ,  $R_s$  et  $R_b$  pour les différents filtres.

	Filtre adapté	Filtre de déclivité	Filtre ACRC	Filtre ACRC	Filtre ACRC
Ordre	$M = 51, N = 5$	$n = 2$	$N_w = 5$	$N_w = 10$	$N_w = 15$
$R_c$	95.49%	89.8%	96,24%	92.5%	88.7%
$R_s$	41.4%	49.69%	61.24%	38.6%	28.65%
$R_b$	34.1%	42.49%	53.15%	32.83%	24.32%

Sur les figures 2.31 and 2.32,  $R_s$  et  $R_b$  sont respectivement représentées en fonction de  $R_c$ , afin de voir quel filtre est le plus proche du compromis idéal ( $R_c = 100\%$ ,  $R_b = R_s = 0\%$ ). On peut voir que le filtre adapté est celui qui offre le meilleur compromis en terme de réduction de clutter et protection des signatures de mines.

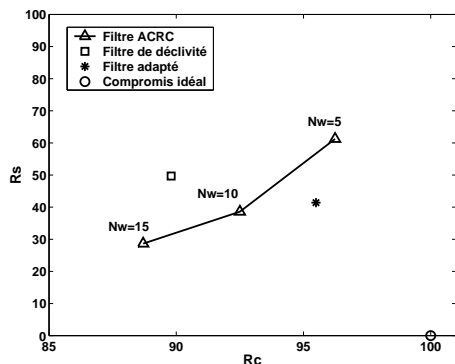


FIG. 2.31:  $R_s$  en fonction de  $R_c$  pour les différents filtres.

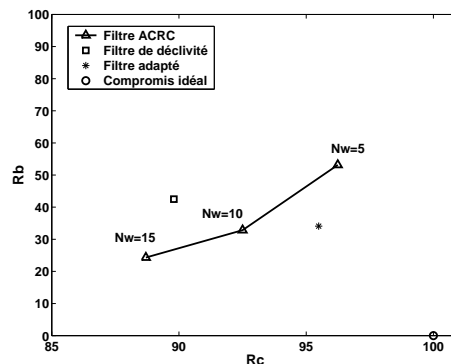


FIG. 2.32:  $R_b$  en fonction de  $R_c$  pour les différents filtres.

## 2.2.6 Résumé

L'ensemble des résultats de simulation montre que le filtre conçu est bien adapté à la réduction de clutter sur les données Bscan. Il permet en effet de réduire le clutter, tout en préservant les signatures des mines, même lorsque celles-ci sont noyées dans le clutter. Ce filtre est robuste puisqu'il permet de réduire le clutter même lorsque celui-ci n'est pas représenté par des bandes parfaitement horizontales dans le Bscan. L'intérêt de ce filtre est que ses paramètres ne dépendent pas des propriétés physiques du milieu de propagation mais des paramètres d'enregistrement du GPR ( $x_1, \nu_{xs}$ ). La distance  $x_1$  dépend du nombre de Ascans utilisés pour former le Bscan tandis que  $\nu_{xs}$ , la fréquence d'échantillonnage spatiale, est un paramètre propre au radar utilisé. Les fréquences de coupure peuvent être déterminées automatiquement grâce aux relations (2.35), (2.40) et (2.41). Pour ne pas dégrader significativement les signatures des mines, il faut s'assurer que la taille de leurs signatures suivant l'axe  $x$  soit petite devant  $x_1$ . Ce qui est équivalent à dire que l'étalement du spectre du clutter doit être petit devant celui des mines. De plus l'implémentation de ce filtre est simple et le coût du calcul faible.

## 2.3 Conception d'un filtre numérique adapté aux données Cscan

Sur des données Cscan, enregistrées par un radar à pénétration de sol comme celui de la figure 2.33, les réponses des mines antipersonnel, apparaissent sous forme de disque ou d'ellipse tandis que le clutter est constitué de larges bandes horizontales ou verticales. La variation du clutter sur une donnée Cscan peut s'expliquer par des variations de la hauteur du GPR lors des mesures, par la rugosité du sol ou encore par des variations des paramètres physiques du sol (ex : teneur en eau). Le filtre doit être conçu de façon à éliminer le clutter tout en préservant les réponses des mines (disque ou ellipse). Ainsi des méthodes de détection, basées sur l'utilisation d'une transformée de Hough telles que ([FL99], [YKF03]), qui recherchent la présence de cercles et d'ellipses sur des Cscans

pourront être utilisées par la suite. Une analyse comparative des spectres d'amplitude approchés du clutter et d'une signature de mine est réalisée, afin de mettre en évidence, les composantes fréquentielles du clutter qui peuvent être éliminées, sans pour autant apporter des distortions significatives aux signaux provenant des mines. A partir de ce résultat, le gabarit d'un filtre numérique optimal pour la réduction de clutter sur des données Cscan est construit.

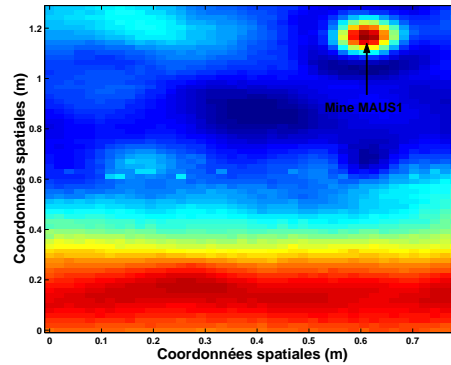


FIG. 2.33: Donnée Cscan enregistrée au dessus d'un sol constitué de sable.

### 2.3.1 Modélisation et analyse fréquentielle du clutter

Une donnée Cscan peut être définie par une fonction, notée  $I(x, y)$ , où  $x$  et  $y$  représentent les coordonnées spatiales variant respectivement de 0 à  $x_1$  et de 0 à  $y_1$ .

Sur une donnée Cscan typique (voir figure 2.33), le clutter peut varier suivant  $x$  et  $y$ . Il apparaît sous forme de plusieurs bandes horizontales ou verticales. Par conséquent, on peut découper une donnée Cscan en plusieurs rectangles à l'intérieur desquels le clutter est quasiment homogène. La figure 2.34 représente la découpe du clutter du Cscan de la figure 2.33 en plusieurs bandes de clutter homogène. Ces bandes ayant un fort contraste, elles peuvent être modélisées géométriquement par une fonction rectangle.

Chaque bande de clutter peut ainsi être modélisée, par la fonction  $\Pi_i(x, y)$ , définie de la façon suivante :

$$\Pi_i(x, y) = I_{i,1}(x)I_{i,2}(y) \quad (2.46)$$

$$\text{avec } \begin{cases} I_{i,1}(x) = A_i & x \in [x_i, x_i + L_{i,x}] \\ I_{i,1}(x) = 0 & x \notin [x_i, x_i + L_{i,x}] \end{cases} \text{ et } \begin{cases} I_{i,2}(y) = A_i & y \in [y_i, y_i + L_{i,y}] \\ I_{i,2}(y) = 0 & y \notin [y_i, y_i + L_{i,y}] \end{cases}$$

où  $L_{i,x}$  est la longueur suivant  $x$  de la  $i$ -ième bande de clutter,  $L_{i,y}$  sa largeur suivant  $y$  et  $A_i$  son amplitude moyenne.

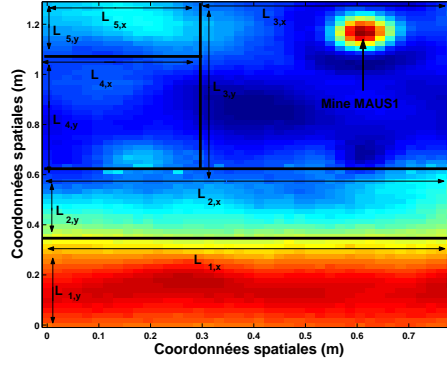


FIG. 2.34: Découpe de la donnée Cscan en 5 rectangles à l'intérieur desquels le clutter est quasiment homogène.

### • Analyse fréquentielle d'une bande de clutter

On considère maintenant une donnée Cscan constituée uniquement de la  $i$ -ième bande homogène du clutter. Ce Cscan peut être modélisé par la fonction suivante :

$$I_c(\nu_x, \nu_y) = \Pi_i(x, y) \quad (2.47)$$

La représentation spectrale d'une bande de clutter est obtenue en utilisant une transformée de fourier 2D :

$$I_c(\nu_x, \nu_y) = \int_{x_i}^{x_i+L_{i,x}} \int_{y_i}^{y_i+L_{i,y}} I_c(x, y) e^{-2i\pi x\nu_x} e^{-2i\pi y\nu_y} dx dy \quad (2.48)$$

après calcul on obtient :

$$I_c(\nu_x, \nu_y) = A_i L_{i,x} L_{i,y} e^{-2i\pi(x_i\nu_x + y_i\nu_y)} e^{-i\pi(L_{i,x}\nu_x + L_{i,y}\nu_y)} \text{sinc}(\pi L_{i,x}\nu_x) \text{sinc}(\pi L_{i,y}\nu_y) \quad (2.49)$$

Le spectre d'amplitude s'écrit ainsi :

$$|I_c(\nu_x, \nu_y)| = A_i L_{i,x} L_{i,y} |\text{sinc}(\pi L_{i,x}\nu_x) \text{sinc}(\pi L_{i,y}\nu_y)| \quad (2.50)$$

L'énergie est par conséquent constituée d'un produit de deux sinus cardinaux. Si l'on considère que l'énergie principale d'une telle fonction est située dans les deux premiers lobes des sinus cardinaux, l'énergie principale du clutter est située dans le sous espace  $S_c$  suivant :

$$S_c = \left\{ (\nu_x, \nu_y) \left| |\nu_x| \in \left[0, \frac{2}{L_{i,x}}\right], |\nu_y| \in \left[0, \frac{2}{L_{i,y}}\right] \right. \right\} \quad (2.51)$$

Plus  $L_{i,x}$  et  $L_{i,y}$  sont grands, plus l'étalement du spectre de la bande de clutter ainsi modélisée, est petit. Lorsque le clutter est homogène sur une donnée Cscan réelle de la campagne MACADAM, il peut être représenté par une fonction rectangle de paramètres  $L_{i,x} = 1$  m et  $L_{i,y} = 1.5$  m. Dans ce cas, l'étalement du spectre du clutter est minimale

et l'énergie principale du clutter est contenue dans le sous espace  $S_{c_m}$  suivant :

$$S_{c_m} = \{(\nu_x, \nu_y) \mid |\nu_x| \in [0, 2], |\nu_y| \in [0, 1.33]\} \quad (2.52)$$

A partir de l'observation des données Cscans de la campagne MACADAM, on peut dire que  $L_{i,x} \in [0.3, 1]$  et  $L_{i,y} \in [0.3, 1.5]$ . Ainsi, l'étalement du spectre du clutter est maximal pour  $L_{i,x} = 0.3$  m et  $L_{i,y} = 0.3$  m, l'énergie principale du clutter étant alors contenue dans le sous espace  $S_{c_M}$  suivant :

$$S_{c_M} = \{(\nu_x, \nu_y) \mid |\nu_x| \in [0, 6.6], |\nu_y| \in [0, 6.6]\} \quad (2.53)$$

La figure 2.35 représente les spectres d'amplitude d'une bande de clutter suivant  $\nu_x$  pour  $L_{i,x} = 0.3$  m et  $L_{i,x} = 1$  m.

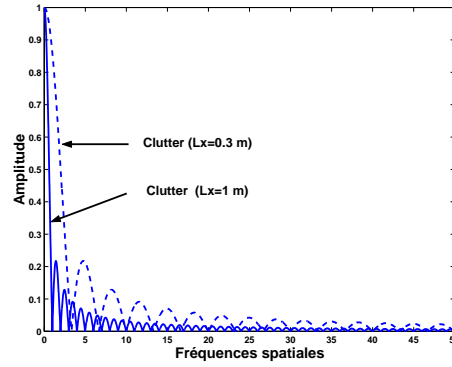


FIG. 2.35: Spectre d'amplitude d'une bande de clutter suivant  $\nu_x$  pour  $L_{i,x} = 1$ m et  $L_{i,x} = 0.3$ m.

#### • Analyse fréquentielle du clutter

Sur une donnée Cscan réelle comme celle représentée Fig.2.34, le clutter est constitué de 5 bandes horizontales ( $N_{bc} = 5$ ). Par conséquent, un modèle géométrique du clutter pour cette donnée Cscan peut être défini de la façon suivante :

$$I_{clutter}(x, y) = \sum_{i=1}^{N_{bc}} \Pi_i(x, y) \quad (2.54)$$

où  $\Pi_i(x, y)$  est la fonction définissant la  $i$ -ième bande de clutter. Le spectre totale du clutter est obtenu en utilisant la transformée de Fourier 2D et s'écrit :

$$I_{clutter}(\nu_x, \nu_y) = \sum_{i=1}^{N_{bc}} \Pi_i(\nu_x, \nu_y) \quad (2.55)$$

où  $\Pi_i(\nu_x, \nu_y)$  est le spectre de la  $i$ -ième bande de clutter. Ainsi, le spectre d'amplitude du clutter est donné par :

$$|I_{clutter}(\nu_x, \nu_y)| = \left| \sum_{i=1}^{N_{bc}} \Pi_i(\nu_x, \nu_y) \right| \quad (2.56)$$

Ainsi, l'amplitude du spectre total du clutter étant égale à l'amplitude de la somme cohérente des spectres de chacune des bandes du clutter, le spectre d'amplitude du clutter ne peut pas être plus étalé que le plus étalé des spectres parmi  $\{\Pi_i(\nu_x, \nu_y)\}$ ,  $i = 1, \dots, N_{bc}$ . Ce dernier constitue un cas limite pour la sélection de la fréquence de coupure du filtre numérique. En effet, si l'on sélectionne la bande atténuée du filtre de sorte que les deux premiers lobes du sinus cardinale de la bande de clutter dont l'étalement spectrale est le plus grand soient éliminés, on est assuré de filtrer la majeure partie du clutter. Par conséquent, pour concevoir notre filtre, on ne s'intéresse qu'à la bande de clutter qui aura le spectre le plus étalé ou de façon équivalente les plus petites valeurs pour  $L_{i,x}$  et  $L_{i,y}$ . Pour les Cscans réelles de la Campagne Macadam, le sous espace  $S_{c_M}$ , défini par (2.53) contient la majeure partie de l'énergie du clutter. Toutefois, avant de définir la bande atténuée du filtre comme étant le sous espace  $S_{c_M}$ , il nous faut étudier le spectre de la réponse d'une mine afin de s'assurer que les signatures des mines ne soient pas dégradées de façon significative par le filtrage.

### 2.3.2 Modélisation et analyse fréquentielle de la réponse d'une mine

Les réponses des mines antipersonnel apparaissent sous forme de disque ou d'ellipse sur des données Cscans. Par conséquent, la réponse d'une mine peut être modélisée par la fonction  $I_s(x, y)$  définie de la façon suivante :

$$\begin{cases} I_s(x, y) = 1 & \text{si } \forall(x, y), (x - x_0)^2 + \left(\frac{a}{b}\right)^2(y - y_0)^2 \leq a^2 \\ I_s(x, y) = 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.57)$$

avec  $a$  le demi axe de l'ellipse suivant  $x$  et  $b$  le demi axe de l'ellipse suivant  $y$  et  $(x_0, y_0)$  la position du centre de l'ellipse sur le Cscan. Dans le cas où la réponse d'une mine est représentée par un disque sur une donnée Cscan, il suffit de prendre  $a = b$ , avec  $a$  le rayon du disque.

La représentation spectrale du signal est obtenue en utilisant une transformée de fourier 2D en coordonnées polaires. Le changement de variable suivant est réalisé :

$$\begin{cases} x - x_0 & = r \cos(\theta) \\ \left(\frac{a}{b}\right)(y - y_0) & = r \sin(\theta) \end{cases} \quad (2.58)$$

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

$$I_s(\nu_x, \nu_y) = \int_0^a \int_0^{2\pi} e^{-2i\pi\nu_x(r \cos(\theta)+x_0)} e^{-2i\pi\nu_y(\frac{b}{a}r \sin(\theta)+y_0)} r dr d\theta \quad (2.59)$$

Les calculs menant à l'expression finale de la réponse fréquentielle se trouvent dans l'annexe D.3. La réponse fréquentielle d'une ellipse s'exprime ainsi de la façon suivante :

$$I_s(k_r) = e^{-2i\pi k_r(\cos(k_\theta)x_0 + \frac{a}{b} \sin(k_\theta)y_0)} \left[ 2\pi \int_0^a J_0(2\pi k_r r) r dr \right] \quad (2.60)$$

La propriété suivante est utilisée par la suite :

$$\int_0^u v J_0(v) dv = u J_1(u) \quad (2.61)$$

L'amplitude du spectre d'une ellipse s'écrit finalement :

$$|I_s(k_r)| = \frac{a}{k_r} |J_1(2\pi k_r a)| \quad (2.62)$$

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 :

$$J_1(z) = \frac{1}{2i\pi} \int_0^{2\pi} e^{iz \cos(\alpha)} \cos(\alpha) d\alpha \quad (2.63)$$

Sur les données Bscan de la campagne MACADAM, les fréquences d'échantillonnage suivant  $x$  et  $y$  sont identiques. Ainsi, les réponses des mines apparaissent généralement sous forme de disques dont la valeur moyenne du rayon est égale à 6cm. Il est important de remarquer que le spectre d'amplitude d'une mine, modélisée par un disque, est à symétrie circulaire puisqu'il est indépendant de  $k_\theta$ . La figure 2.36 représente le spectre d'amplitude d'un disque de rayon  $a = 6$  cm.

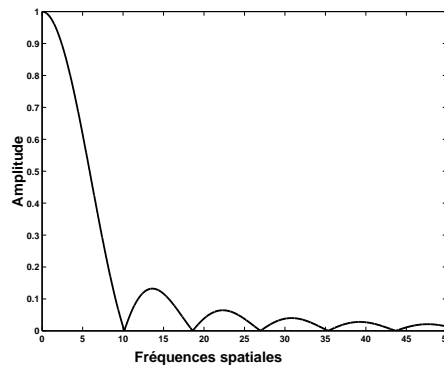


FIG. 2.36: Spectre d'amplitude d'un disque de rayon  $a = 6$  cm.

Pour trouver les zéros du spectre d'amplitude du disque, défini par la relation (2.62), l'approximation asymptotique de  $J_1$ , i.e.  $J_1(t) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi t}} \cos(t - \frac{3\pi}{4})$ , peut être utilisée. Cette approximation est valide pour des valeurs de  $t$  supérieures à 3. Dans le plan complexe,  $J_1(t)$  ne s'annule que pour  $t$  réel. Le  $i^{\text{ème}}$  zéro  $z_i$  peut être approximé par la formule asymptotique suivante :  $z_i \approx \frac{\pi}{4} + i\pi$  pour  $i \geq 2$ . En considérant que l'énergie principale du signal est contenue dans les deux premiers lobes du spectre, pour un disque de rayon  $a = 6$  cm, celle-ci est située dans le sous espace  $S_e$  suivant :

$$S_e = \left\{ (\nu_x, \nu_y) \mid k_r = \sqrt{\nu_x^2 + \nu_y^2} \in [0, 18.75] \right\} \quad (2.64)$$

### 2.3.3 Gabarit du filtre

Afin de définir le gabarit du filtre, la répartition de l'énergie principale du clutter et de celle d'un disque représentant la signature d'une mine sont comparées, voir figure 2.37. Pour les données Cscans réelles de la campagne MACADAM, l'énergie principale du clutter est contenue à l'intérieur du sous espace  $S_{c_M}$  défini par (2.53), et celle d'une mine de rayon  $a = 6$  cm à l'intérieur du sous espace  $S_e$  défini par (2.64).

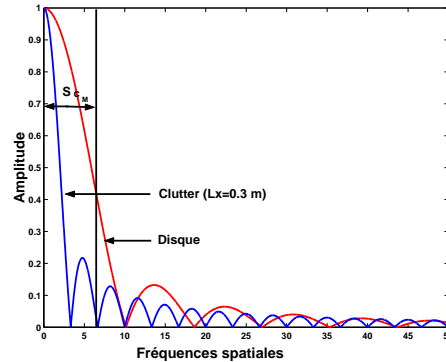


FIG. 2.37: Spectres du clutter et du disque suivant  $k_r$ .

Pour réduire la majorité du clutter il faut choisir le sous espace  $S_{c_M}$  comme bande atténuée du filtre. L'étalement du lobe principale du spectre d'amplitude d'une mine étant de  $10,1 \text{ m}^{-1}$ , plus de la moitié du lobe principal du spectre de la mine est éliminée par un tel filtrage (figure 2.37). Ceci peut engendrer des dégradations notables sur les signatures des mines. En effet, l'action d'un filtre passe-haut étant d'éliminer les zones uniformes de l'image, l'intérieur du disque modélisant la réponse d'une mine peut être en partie éliminé par le filtrage. Ainsi, le choix de  $S_{c_M}$  comme bande atténuée du clutter n'est pas approprié. Cependant, on peut définir la bande atténuée du filtre en fonction de la dégradation maximale tolérée sur la signature des mines.

On choisit de tester indépendamment deux filtres sur une donnée Cscan contenant un disque de rayon  $a=10$  cm et d'amplitude égale à 1. La bande atténuée du premier filtre est telle qu'un quart de l'énergie contenue dans le lobe principale du spectre du disque est éliminé par le filtrage tandis que celle du second permet d'éliminer la moitié de l'énergie contenue dans le lobe principale. Les résultats des deux filtrages sont représentés sur les figures 2.38 et 2.39. La bande atténuée du filtre permettant d'éliminer un quart de l'énergie du lobe principale du spectre du disque est la plus adaptée à la réduction de clutter sur des données Cscan puisqu'elle préserve la partie centrale du disque.

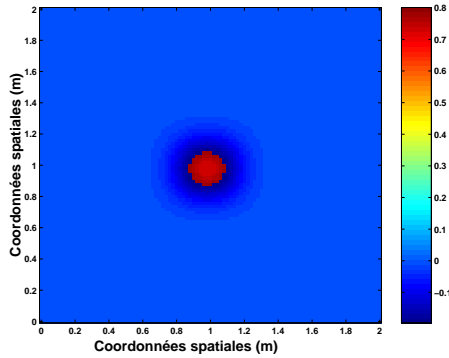


FIG. 2.38: Disque de rayon 10 cm après filtrage. Un quart de l'énergie contenue dans le lobe principale du spectre du disque est éliminé par le filtrage.

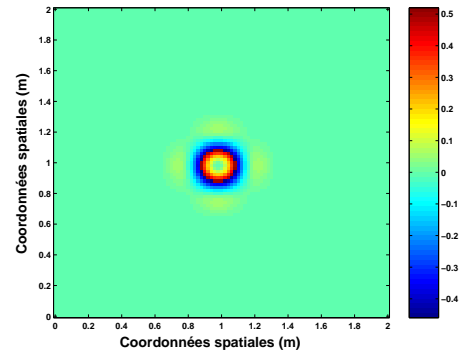


FIG. 2.39: Disque de rayon 10 cm après filtrage. La moitié de l'énergie contenue dans le lobe principale du spectre du disque est éliminée par le filtrage.

Le spectre d'une bande de clutter étant généralement moins étalé que celui d'un disque modélisant la réponse d'une mine antipersonnel, on peut choisir la bande atténuée du filtre passe haut de sorte que moins d'un quart de l'énergie contenue dans le lobe principal du spectre du disque suivant  $x$  et  $y$  soit éliminé par le filtrage (cette valeur a été déterminée expérimentalement). Ceci permet de limiter les dégradations apportées par le filtrage aux signatures des mines, tout en garantissant d'éliminer dans la majorité des cas, au minimum la majeure partie de l'énergie contenue dans le lobe principal du spectre du clutter. L'étalement du premier lobe du spectre d'un disque dépend de son rayon  $a$  et vaut  $\frac{3.93}{2\pi a}$ . La bande atténuée du filtre passe haut idéal pour la réduction de clutter sur les données Cscan est alors définie par le sous espace  $S_a$  suivant :

$$S_a = \{(\nu_x, \nu_y) \mid |\nu_x| \in [0, \beta_{max}], |\nu_y| \in [0, \beta_{max}]\} \quad \text{avec} \quad \beta_{max} = \frac{3.93}{8\pi a} \quad (2.65)$$

Pour nos données Cscans réelles le rayon moyen des disques modélisant les réponses des mines antipersonnel est égal à 6 cm. Ainsi, la bande atténuée du filtre passe haut est contenue dans le sous espace suivant :

$$S_a = \{(\nu_x, \nu_y) \mid |\nu_x| \in [0, 2.6], |\nu_y| \in [0, 2.6]\} \quad (2.66)$$

L'étalement maximal du lobe principal d'une bande de clutter étant pour ces données égal à  $3.3 \text{ m}^{-1}$ , le filtre ainsi conçu permet de garantir une réduction significative du clutter (au minimum la majeure partie du lobe principal du spectre du clutter) sur l'ensemble des données Cscans réelles, voir figure 2.40.

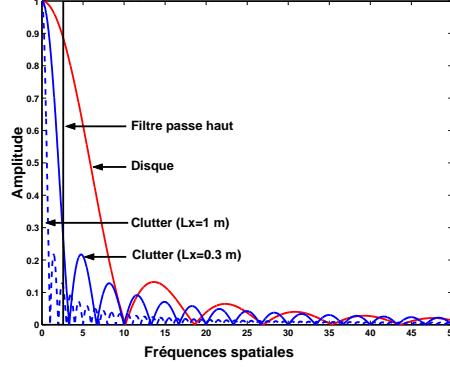


FIG. 2.40: Spectres du clutter, du disque et du filtre suivant  $k_r$

## 2.3.4 Réduction de clutter par un filtre numérique RIF

### 2.3.4.1 Spécification du filtre dans le domaine fréquentiel

On souhaite synthétiser un filtre RIF de type passe-haut adapté aux données Cscan. Pour cela, on peut utiliser la modélisation et l'analyse précédente afin de construire le gabarit du filtre qui contient la réponse fréquentielle du filtre désirée, notée  $G(\nu_x, \nu_y)$ . Celle-ci est définie de la manière suivante :

$$\begin{cases} G(\nu_x, \nu_y) = 0 & (\nu_x, \nu_y) \in S_a \\ G(\nu_x, \nu_y) = 1 & (\nu_x, \nu_y) \notin S_a \end{cases} \quad (2.67)$$

où  $S_a$  est le domaine défini précédemment :

$$S_a = \{(\nu_x, \nu_y) \mid |\nu_x| \in [0, \beta_{max}], |\nu_y| \in [0, \beta_{max}]\} \text{ avec } \beta_{max} = \frac{3.93}{8\pi a} \quad (2.68)$$

Le gabarit du filtre numérique adapté aux données Cscan est obtenu en utilisant une transformée bilinéaire (voir annexe D.2). La réponse en fréquence du filtre idéal, notée  $G_d(\nu_{xn}, \nu_{yn})$  est ainsi définie par :

$$\begin{cases} G_d(\nu_{xn}, \nu_{yn}) = 0 & (\nu_{xn}, \nu_{yn}) \in S_{ad} \\ G_d(\nu_{xn}, \nu_{yn}) = 1 & (\nu_{xn}, \nu_{yn}) \notin S_{ad} \end{cases} \quad (2.69)$$

où  $\nu_{xn}$  est la fréquence spatiale numérique, telle que  $|\nu_{xn}| \in [0, \frac{\nu_{xs}}{2}]$ , avec  $\nu_{xs}$  la fréquence d'échantillonnage suivant  $x$ .  $\nu_{yn}$  est la fréquence spatiale numérique, telle que  $|\nu_{yn}| \in$

$[0, \frac{\nu_{ys}}{2}]$ , avec  $\nu_{ys}$  la fréquence d'échantillonnage suivant  $y$ . Le domaine  $S_{ad}$  est défini par :

$$S_{ad} = \{(\nu_{xn}, \nu_{yn}) \mid |\nu_{xn}| \in [0, \beta_x] \text{ et } |\nu_{yn}| \in [0, \beta_y]\} \quad (2.70)$$

où

$$\beta_x = \frac{\nu_{xs}}{\pi} \arctan\left(\frac{\beta_{max}\pi}{\nu_{xs}}\right) \quad (2.71)$$

et

$$\beta_y = \frac{\nu_{ys}}{\pi} \arctan\left(\frac{\beta_{max}\pi}{\nu_{ys}}\right) \quad (2.72)$$

### 2.3.4.2 Réponse impulsionnelle du filtre

En utilisant une transformée de fourier discrète inverse il est possible de calculer la réponse impulsionnelle  $g(n_x, n_y)$  du filtre numérique défini à partir de (2.69) :

$$g(n_x, n_y) = \delta(n_x, n_y) - \frac{4\beta_x\beta_y}{\nu_{xs}\nu_{ys}} \text{sinc}\left(\frac{2\pi n_x\beta_x}{\nu_{xs}}\right) \text{sinc}\left(\frac{2\pi n_y\beta_y}{\nu_{ys}}\right) \quad (2.73)$$

La fenêtre choisie pour la troncature de la réponse impulsionnelle est une fenêtre bidimensionnelle de hanning. La réponse impulsionnelle réelle est :

$$g_f(n_x, n_y) = g(n_x, n_y) \frac{(1 - \cos(\frac{2\pi n_x}{N_x - 1}))(1 - \cos(\frac{2\pi n_y}{N_y - 1}))}{4} \quad (2.74)$$

avec  $N_x \in [0, N_x - 1]$  et  $N_y \in [0, N_y - 1]$ ,  $N_x$  représentant le nombre d'échantillons de la fenêtre suivant  $x$  et  $N_y$  le nombre d'échantillons suivant  $y$ .

### 2.3.4.3 Réglage des paramètres du filtre

Les paramètres du filtre sont  $\beta_{max}$ ,  $\nu_{xs}$ ,  $\nu_{ys}$ ,  $N_x$  et  $N_y$ . Le paramètre  $\beta_{max}$  correspond à l'étalement du premier lobe du spectre du disque modélisant la réponse d'une mine.  $\beta_{max}$  dépend uniquement de la valeur du rayon du disque  $a$ , celle-ci étant directement liée à la taille des mines antipersonnel. Les fréquences d'échantillonnage spatiales  $\nu_{xs}$  et  $\nu_{ys}$ , sont des paramètres propres au radar utilisé et sont donc connues. La taille du filtre est identique à celle de la fenêtre de hanning. Par conséquent, les nombres de coefficients  $N_x$  et  $N_y$  du filtre sont respectivement égaux aux nombres d'échantillons spatiaux suivant  $x$  et  $y$  de la fenêtre utilisée pour tronquer la réponse impulsionnelle. La réponse en fréquence du filtre réel est obtenue en prenant le produit de convolution entre la réponse en fréquence du filtre idéal et la réponse en fréquence d'une fenêtre de hanning bidimensionnelle. Il faut que le produit de convolution soit nul dans le domaine  $S_{ad}$  si l'on veut éliminer la majeure partie du clutter. Pour cela, il faut que la largeur de la fenêtre de hanning suivant l'axe  $\nu_x$ , notée  $L_{hx}$ , soit strictement inférieure à  $2\beta_x$  et que la largeur de la fenêtre suivant l'axe  $\nu_y$ , notée  $L_{hy}$ , soit strictement inférieure à  $2\beta_y$ .

La largeur du spectre d'une fenêtre de hanning en fréquence réduite étant égale à  $\frac{4}{N_w}$  avec  $N_w$  le nombre d'échantillons de la fenêtre, on a :  $L_{hx} = \frac{4}{N_x}$  et  $L_{hy} = \frac{4}{N_y}$ . Pour des fréquences réduites, il faut choisir  $N_x$  et  $N_y$  de la façon suivante :

$$L_{hx} = \frac{4}{N_x} < \frac{2\beta_x}{\nu_{xs}} \implies N_x > \frac{2\nu_{xs}}{\alpha_x} \quad (2.75)$$

$$L_{hy} = \frac{4}{N_y} < \frac{2\beta_y}{\nu_{ys}} \implies N_y > \frac{2\nu_{ys}}{\alpha_y} \quad (2.76)$$

De plus, les nombres de coefficients du filtre  $N_x$  et  $N_y$  doivent être choisis impairs de sorte que le filtre soit symétrique par rapport à l'origine. Ainsi, connaissant la valeur moyenne  $a$  des rayons des disques présents sur les données Cscan ainsi que les fréquences d'échantillonnage spatiales  $\nu_{xs}$  et  $\nu_{ys}$ , l'ordre du filtre ( $N_x, N_y$ ) peut être déterminé automatiquement en utilisant les relations (2.71), (2.72), (2.75) et (2.76). Le filtre passe haut numérique, ainsi défini peut être appliqué sur des données Cscans, afin de tester sa capacité à éliminer le clutter tout en protégeant les signatures des mines antipersonnel.

## 2.3.5 Simulations

### 2.3.5.1 Données Cscan synthétiques

Le filtre numérique est tout d'abord testé sur le Cscan synthétique de la figure 2.42. Cette donnée provient de la modélisation géométrique de la donnée Cscan réelle représentée sur la figure 2.41. La réponse de la mine est modélisée par un disque de rayon  $a = 6$  cm tandis que le clutter est modélisé par 5 bandes rectangulaires homogènes ( $N_{bc} = 5$ ). Les fréquences d'échantillonnage spatiales  $\nu_{xs}$  et  $\nu_{ys}$  sont telles que  $\nu_{xs} = \nu_{ys} = 50 \text{ m}^{-1}$ . Ainsi, les valeurs  $N_x = 39$  et  $N_y = 39$  peuvent être choisies pour l'ordre du filtre grâce aux relations (2.71), (2.72), (2.75) et (2.76). La bande atténuée du filtre numérique est telle que :  $S_d = \{(\nu_{xn}, \nu_{yn}) \mid |\nu_{xn}| \in [0, 2.57], |\nu_{yn}| \in [0, 2.57]\}$ . La donnée filtrée est représentée figure 2.43.

Grâce au filtrage, le clutter a été significativement réduit, tandis que la signature de la mine n'a pas subi de dégradation majeure. La réponse de la mine est désormais prédominante dans la donnée Cscan filtrée. Bien sûr, ce résultat était attendu puisque le filtre a été conçu à partir de l'analyse fréquentielle d'une donnée Cscan ainsi modélisée.

On peut cependant remarquer que les contours des bandes rectangulaires sont toujours présents. Ceci s'explique par le fait que dans une image les hautes fréquences correspondent à des variations rapides de l'intensité ([Bur01]). Ainsi l'action d'un filtre numérique passe haut ne permet pas d'éliminer totalement les contours des bandes. Cependant dans la réalité, les propriétés physiques du sol (permittivité diélectrique, conductivité) évoluent généralement de manière progressive plutôt que brutale. Ceci ce traduit par des variations d'intensité plus lentes au niveau des contours des bandes de clutter.

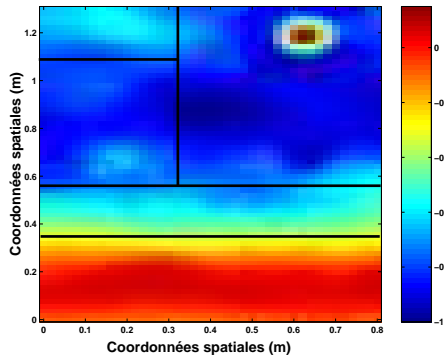


FIG. 2.41: Donnée Cscan réelle.

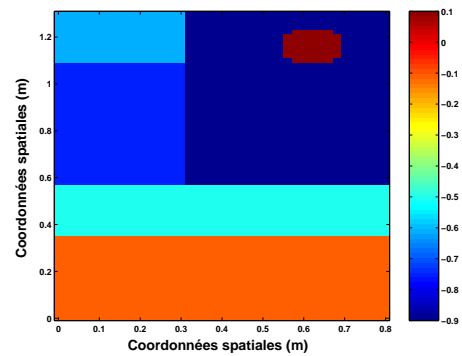


FIG. 2.42: Modèle géométrique de la donnée Cscan de la figure 2.41.

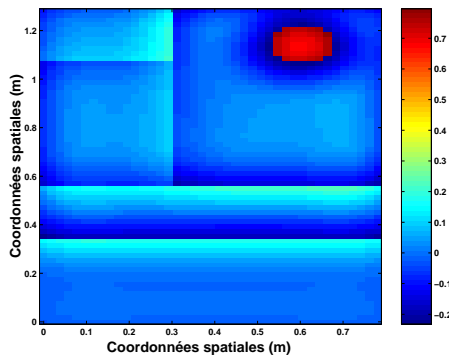


FIG. 2.43: Donnée Cscan de la figure 2.42 après filtrage.

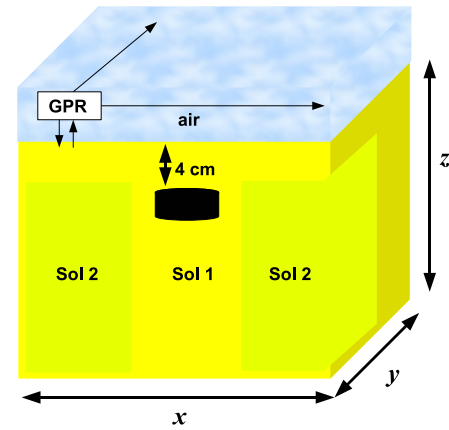


FIG. 2.44: Configuration pour la méthode split step.

Ceux-ci sont alors atténués plus significativement par le filtrage. Ce dernier point peut être visualisé grâce à une donnée synthétique plus réaliste, voir figure 2.45. La méthode split step 3D présentée dans [Rej02] a été utilisée pour créer ce Cscan. Un pulse électromagnétique, modélisé par une fonction gaussienne, a été envoyé à une hauteur de 10 cm au dessus d'un sol hétérogène dans lequel un objet cylindrique de rayon  $a = 6$  cm a été enfoui à une profondeur de 4 cm. La fréquence centrale du spectre du pulse est de 900 MHz. La configuration pour la simulation est représentée sur la figure 2.44. Pour appliquer la méthode split step, la permittivité diélectrique relative ( $\epsilon_r$ ) et le facteur de qualité ( $Q$ ) des différents types de sol et de l'objet doivent être connus. Les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau 2.5.

Les paramètres du filtre  $a$ ,  $\nu_{xs}$  et  $\nu_{ys}$  étant identiques à ceux de la donnée précédente, on utilise le même filtre. La figure 2.46 présente le résultat de l'opération de filtrage. Le clutter a été fortement réduit tandis que la signature de la mine a été préservée, celle-ci étant désormais prédominante dans la donnée Cscan filtrée. On peut également remar-

TAB. 2.5: Paramètres de simulation

	$\varepsilon_r$	$Q$	profondeur
Sol 1	3.3	60	-
Sol 2	[3.3,4]	60	4 cm
Objet	10	5000	4 cm

quer que les contours des bandes de clutter ont été entièrement filtrés. Ceci s'explique par le fait que la transition entre le sol 1 et le sol 2 se fait progressivement, la permittivité diélectrique du sol 2 variant de 3.3 à 4. Ainsi, les variations d'intensité au niveau des bandes de clutter ne sont pas brutales. Le filtre numérique conçu pour la réduction de clutter est bien adapté aux données Cscan il permet de réduire significativement le clutter tout en préservant les réponses des mines. Il peut à présent être testé sur des données réelles.

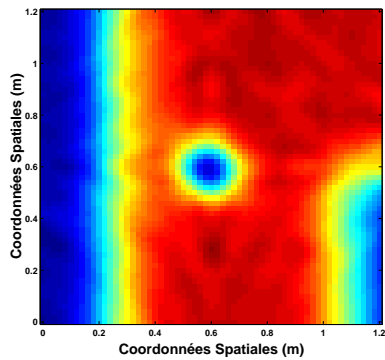


FIG. 2.45: Donnée Cscan synthétique obtenue par la méthode split step.

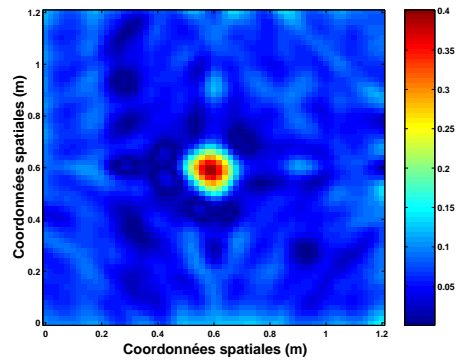


FIG. 2.46: Donnée Cscan de la figure 2.45 après filtrage.

### 2.3.5.2 Données Cscan réelles

Les données Cscan réelles de la campagne MACADAM, décrites dans l'annexe B, sont utilisées pour tester le filtre numérique. Les Cscans réels sélectionnés, représentent les enregistrements d'un GPR au dessus de différents types de sol, dans lesquels plusieurs types de mines antipersonnel ont été enfouies à différentes profondeurs. Le rayon moyen des disques caractérisant les réponses des mines sur l'ensemble des données Cscan est égal à environ 6 cm. Les paramètres du filtre sont :  $a = 6$  cm,  $\nu_{xs} = \nu_{ys} = 50$  m<sup>-1</sup>. Ainsi, le gabarit du filtre est le même que celui utilisé pour les données Cscan synthétiques.

Considérons le Cscan de la figure 2.47. Sur cette image, une réponse de mine antipersonnel de type MAUS1 (contenu métallique) est visible. Cette réponse provient d'une mine affleurante posée sur un sol constitué de sable. La donnée Cscan filtrée est représen-

tée figure 2.48. Les bandes horizontales représentant le clutter ont été éliminées tandis que la signature de la mine n'a pas été dégradée par le filtrage. L'amplitude de la réponse de la mine est désormais prédominante dans la donnée Cscan filtrée.

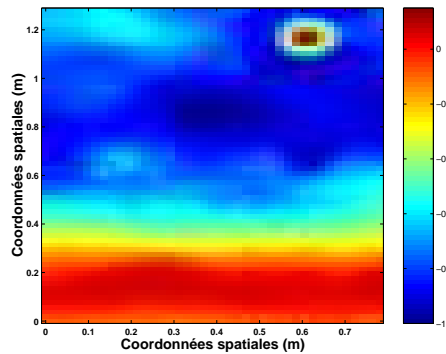


FIG. 2.47: Donnée Cscan enregistrée au dessus d'un sol constitué de sable.

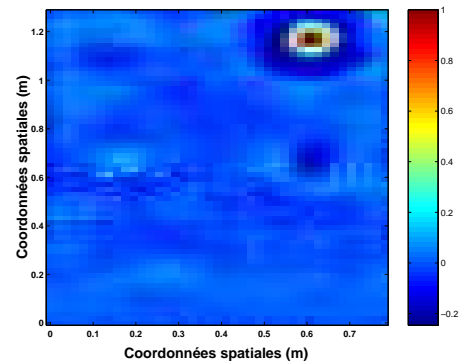


FIG. 2.48: Donnée Cscan de la figure 2.47 après filtrage.

Un autre exemple, nous permet d'étudier le cas où le clutter apparaît sous forme de bandes non rectangulaires. Sur le Cscan de la figure 2.49, les réponses provenant d'une mine MAUS1 posée sur le sol et d'une mine MAUS1 affleurante ont été enregistrées. La figure 2.50 montre le résultat de l'opération de filtrage. Les bandes représentant le clutter ont été éliminées ainsi que leurs contours. Les signatures des mines n'ont pas été dégradées par le filtrage.

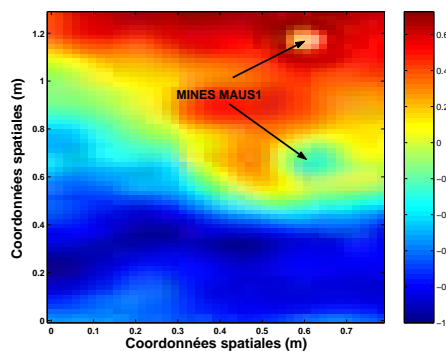


FIG. 2.49: Donnée Cscan enregistrée au dessus d'une terre recouverte d'herbe.

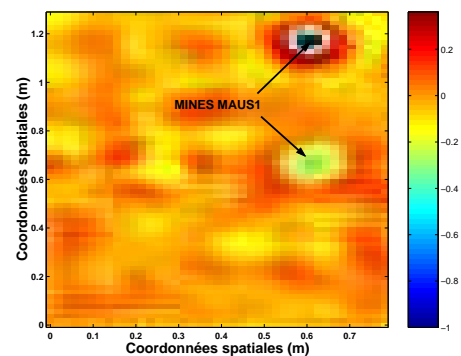


FIG. 2.50: Donnée Cscan de la figure 2.49 après filtrage.

Le filtre est maintenant testé sur le Cscan de la figure 2.51, résultant des enregistrements d'un GPR au dessus d'une terre recouverte d'herbe. Quatre réponses de mines antipersonnel de faible contenu métallique ont été enregistrées sur cette donnée. Celles-ci proviennent de deux mines VSMK2 enfouies à 5 cm de l'interface air-sol, d'une mine

AUPS posée sur le sol et d'une mine AUPS affleurante. Certaines de ces réponses sont difficilement visibles sur le Cscan, leurs réponses étant noyées dans celle du clutter. Comme le montre la figure 2.52, après filtrage le clutter a été en grande partie éliminé, il reste cependant quelques résidus de clutter. Ceux-ci proviennent des zones du Cscan où les variations de l'amplitude du clutter sont rapides. Pour éliminer les résidus du clutter sur cette donnée, il faudrait élargir la bande atténuée du filtre mais ceci au détriment des signatures des mines. Dans le cadre de la détection de mines antipersonnel on choisit de privilégier la protection des signatures des mines au risque d'augmenter le taux de fausses alarmes.

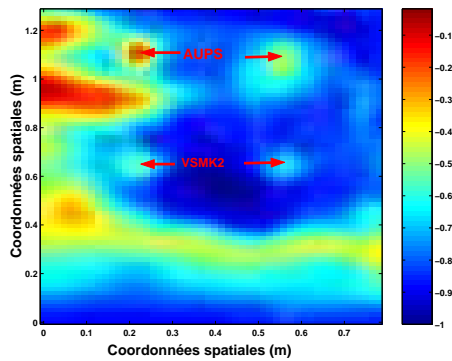


FIG. 2.51: Donnée Cscan enregistrée au dessus d'une terre recouverte d'herbe.

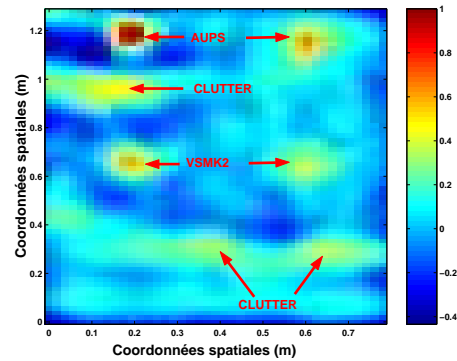


FIG. 2.52: Donnée Cscan de la figure 2.51 après filtrage.

Enfin, le filtre numérique est testé sur la donnée Cscan représentée sur la figure 2.53. Cette donnée a été enregistrée au dessus d'un sol constitué de sable. La réponse d'une mine plastique de type VAR40, posée sur le sol et camouflée avec de l'herbe, a été enregistrée sur cette donnée. Cependant elle n'est pas visible sur le Cscan car sa réponse est noyée dans celle du clutter. En effet, les mines de type VAR40 ne contiennent pratiquement pas de métal, l'amplitude de leur réponse est par conséquent très faible. Comme le montre la figure 2.54, après filtrage le clutter est significativement réduit et la réponse de la mine apparaît clairement sur l'image.

Dans le paragraphe suivant l'action de notre filtre sur les données Cscan est comparée à celles des filtres ACRC.

### 2.3.6 Evaluation des performances du filtre

Les performances de notre filtre sont évaluées grâce à une comparaison avec l'algorithme classique de réduction de clutter couramment utilisé pour réduire le clutter sur les données du GPR (voir section 1.3.2.2).

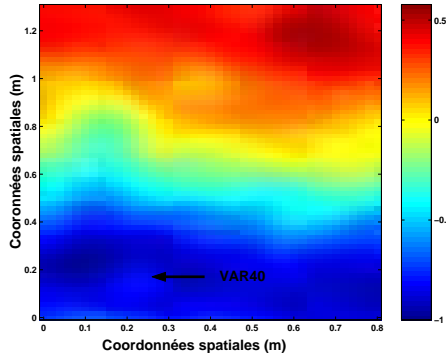


FIG. 2.53: Donnée Cscan enregistrée au-dessus d'un sol constitué de sable.

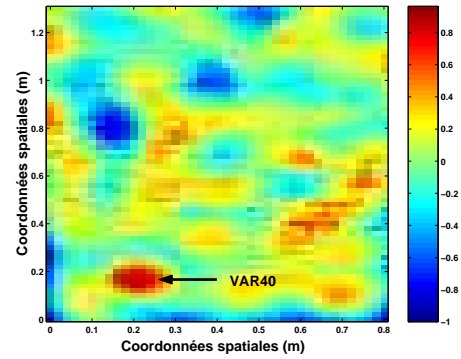


FIG. 2.54: Donnée Cscan de la figure 2.53 après filtrage.

Pour cela, on mesure la capacité de chacun de ces filtres à éliminer le clutter et à préserver les signaux provenant des mines. Ceci peut être réalisé grâce à la mesure du pourcentage de puissance du clutter, qui est éliminé par le filtrage, noté  $R_c$ , et grâce à une mesure du pourcentage de dégradation apportée par le filtrage au signal d'une mine, noté  $R_m$ . Ainsi, le meilleur filtre est celui qui garantit le meilleur compromis entre réduction de clutter et protection des signatures de mines. Ceci est équivalent à rechercher dans le cas idéal, le filtre pour lequel la valeur de  $R_c$  est maximale tandis que celle de  $R_m$  est minimale.

La signature d'une mine antipersonnel sur une donnée Cscan a été modélisée dans ce chapitre par un disque dont le spectre d'amplitude est défini par la relation (2.62) tandis que le spectre d'amplitude approché d'une bande de clutter est donné par la relation (2.50). Ainsi, le pourcentage de puissance d'une bande de clutter qui est éliminé par le filtrage suivant l'axe  $\nu_x$  est mesuré de la façon suivante :

$$R_c = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |\text{sinc}(\pi L_{i,x} \nu_x)|^2 |1 - G(\nu_x, 0)|^2 d\nu_x}{\int_{-\infty}^{\infty} |\text{sinc}(\pi L_{i,x} \nu_x)|^2 d\nu_x} 100 \quad (2.77)$$

où  $G(\nu_x, 0)$  est la réponse fréquentielle du filtre pour  $\nu_y = 0$  et  $L_{i,x}$  la largeur de la bande de clutter suivant  $x$ . On peut noter que la dégradation apportée par le filtrage au spectre total du clutter ne peut pas être plus grande que celle apportée au spectre le plus étalé parmi les spectres individuels des différentes bandes de clutter le constituant. Le spectre le plus étalé suivant  $x$  est celui de la bande de clutter pour laquelle la valeur de  $L_{i,x}$  est la plus petite.

Le pourcentage de dégradation apporté au disque par le filtrage suivant l'axe  $\nu_x$  est défini par :

$$R_m = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\nu_x^2} |J_1(2\pi \nu_x a)|^2 |1 - G(\nu_x, 0)|^2 d\nu_x}{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\nu_x^2} |J_1(2\pi \nu_x a)|^2 d\nu_x} 100 \quad (2.78)$$

Les pourcentages de dégradation  $R_c$  et  $R_m$  sont ici définis suivant l'axe  $\nu_x$ , cependant il pourrait tout aussi bien être défini suivant l'axe  $\nu_y$ , l'analyse des résultats étant équivalente.

A partir de l'observation des données Cscans de la campagne MACADAM, les paramètres  $a$  et  $L_{i,x}$  peuvent être choisis de la façon suivante :  $a = 6$  cm,  $L_{i,x} \in [0.3, 1]$ . Le tableau 2.6 donne les valeurs de  $R_c$  et  $R_m$  pour le filtre adapté et les filtres ACRC pour  $N_w = 5, 10, 15$ .

TAB. 2.6:  $R_c$  et  $R_m$  pour les différents filtres.

	Filtre adapté	Filtre ACRC	Filtre ACRC	Filtre ACRC
Ordre	$N_x = 39, N_y = 39$	$N_w = 5$	$N_w = 10$	$N_w = 15$
$R_c$ pour $L_{i,x} = 0.3$ m	81.82%	87.38%	74.7%	62.17%
$R_c$ pour $L_{i,x} = 1$ m	99.54%	96.24%	92.5%	88.75%
$R_m$	42.7%	64.43%	40.82%	30.24%

Sur les figures 2.55 and 2.56,  $R_m$  est représenté en fonction de  $R_c$  pour différentes valeurs de  $L_{i,x}$ , respectivement  $L_{i,x} = 0.3$  m et  $L_{i,x} = 1$  m, afin de voir quel filtre est le plus proche du compromis idéal ( $R_c = 100\%$ ,  $R_m = 0\%$ ). On peut voir que le filtre adapté aux données Cscan est celui qui offre le meilleur compromis en terme de réduction de clutter et protection des signatures de mines. Il permet d'éliminer au minimum 81.82% de l'énergie contenue dans le spectre total du clutter. La dégradation apportée par ce filtre aux signatures des mines se traduit par une atténuation de la partie centrale des disques, leurs contours restent intacts. Les filtres ACRC offrent de moins bon compromis en terme de réduction de clutter. Pour garantir une réduction suffisante du clutter l'ordre  $N_w$  du filtre doit être petit mais cela engendre des dégradations plus importantes sur les signatures des mines. Pour visualiser cela, la donnée Cscan de la figure 2.49 est filtrée indépendamment par deux filtres ACRC d'ordre respectif  $N_w = 5$  et  $N_w = 10$  suivant la direction  $x$ . La fonction de transfert de ces filtres est définie par l'équation (1.18). Les figures 2.57 et 2.58 montrent le résultat de l'opération de filtrage pour ces deux filtres. Le clutter a été suffisamment réduit dans les deux cas cependant la signature de la mine MAUS1 a été séparée en deux disques. On peut noter que plus l'ordre du filtre est petit, plus les zones à variations rapides du clutter sont susceptibles d'être éliminées par le filtrage. Le filtre d'ordre  $N_w = 5$  est celui qui donne les meilleurs résultats en terme de réduction de clutter.

Les filtres ACRC se montrent efficace pour réduire le clutter sur les données Cscan réelles de la campagne MACADAM. Cependant, le principal inconvénient de ses filtres et qu'il dégrade les signatures des mines. En effet, celles-ci sont souvent séparées en plusieurs parties. Ainsi, le nombre de fausses alarmes augmente lorsque ces filtres sont utilisés pour le traitement des données GPR. De plus, pour les réponses des mines dont l'amplitude est faible, l'action de retirer la moyenne, calculée sur les Ascans précédents à

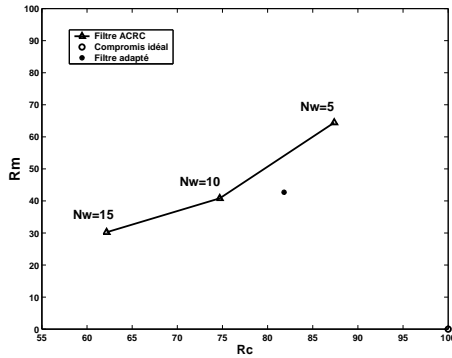


FIG. 2.55:  $R_m$  en fonction de  $R_c$  pour les différents filtres ( $L_{i,x} = 0.3$  m).

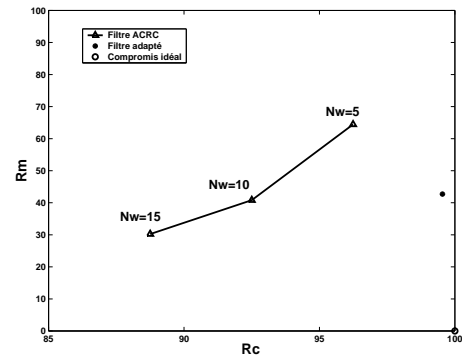


FIG. 2.56:  $R_m$  en fonction de  $R_c$  pour les différents filtres ( $L_{i,x} = 1$  m).

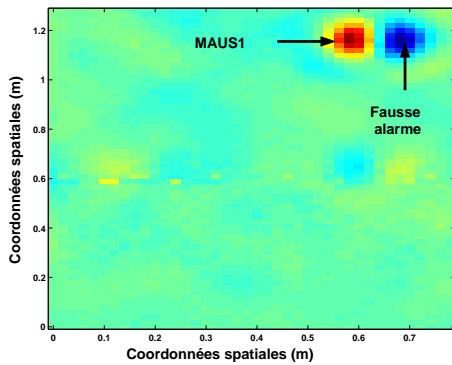


FIG. 2.57: Donnée Cscan de la figure 2.49 après réduction de clutter par un filtre ACRC ( $N_w = 5$ ).

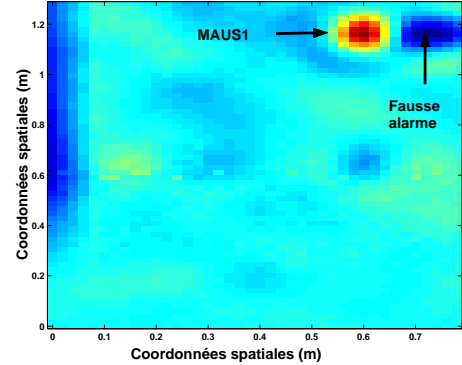


FIG. 2.58: Donnée Cscan de la figure 2.49 après réduction de clutter par un filtre ACRC ( $N_w = 10$ ).

un instant  $t$  donné, réduit encore davantage cette amplitude, d'autant plus si les réponses de ces mines sont noyées dans le clutter. Ainsi, certaines réponses provenant de mines plastiques peuvent être éliminées par le filtrage.

Pour illustrer cela, on étudie l'effet du filtrage sur l'ensemble des 200 Cscans du scénario numéro 11 de la campagne MACADAM. Dans ce scénario, 5 mines antipersonnel de type MAUS1 (métallique) et 1 mine de type AUPS (plastique) ont été enfouies dans un terrain existant à différentes profondeurs, voir annexe B.3. Chacune des données Cscan enregistrée par le GPR pour ce scénario est traitée indépendamment par notre filtre et un filtre ACRC d'ordre  $N_w = 5$ . Afin d'éliminer une partie des résidus de clutter, un seuillage est réalisé sur chacune des données filtrées. Les amplitudes en dessous d'un seuil  $\eta_s$  sont mises à zéro. Un seuil  $\eta_s$  choisi entre 10% et 25% de la valeur maximale parmi les amplitudes des échantillons des données Cscan, issues d'un même scénario de mesure pour les données MACADAM, est approprié. Ensuite, on somme l'ensemble des données Cscan filtrées pour chacun des filtres. On obtient alors, une donnée Cscan unique sur laquelle les réponses des six mines antipersonnel doivent apparaître. Les données Cscan, résultant de ces opérations, pour notre filtre et le filtre ACRC d'ordre 5 sont représentées

respectivement sur les figures 2.59 et 2.60. On peut voir que le filtre conçu dans ce chapitre pour la réduction de clutter sur les données Cscan est efficace puisque seules les réponses des 6 mines antipersonnel sont présentes. Concernant le filtre ACRC d'ordre 5, il a permis de réduire significativement le clutter cependant la réponse de la mine plastique n'apparaît pas et les signatures des 5 mines MAUS1 ont été divisées en deux. Ainsi, si l'on applique une méthode de détection qui recherche les disques ou ellipses sur la donnée Cscan de la figure 2.60, il y aura 5 fausses alarmes et une non détection. Notre filtre est par conséquent plus adapté à la réduction de clutter sur des données Cscan.

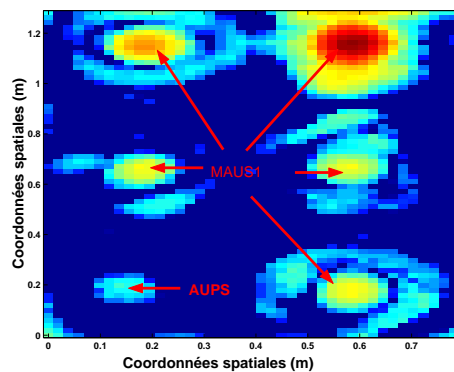


FIG. 2.59: Donnée Cscan correspondant à la somme des données Cscan du scénario 11 traitées individuellement par notre filtre. Un seuillage a été effectué préalablement sur chacune des données Cscan filtrées ( $\eta_s = 0.1$ ).

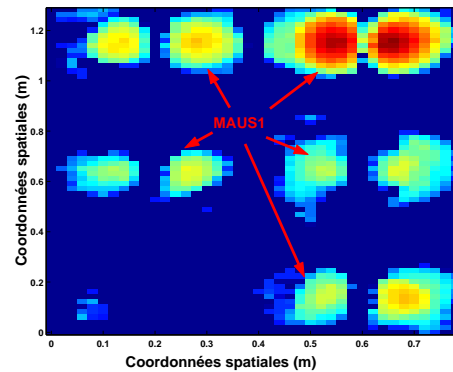


FIG. 2.60: Donnée Cscan correspondant à la somme des données Cscan du scénario 11 traitées individuellement par un filtre ACRC ( $N_w=5$ ). Un seuillage a été effectué préalablement sur chacune des données Cscan filtrées ( $\eta_s = 0.1$ ).

### 2.3.7 Résumé

L'ensemble des résultats de simulation montre que le filtre conçu est bien adapté à la réduction de clutter sur les données Cscan. Il permet en effet de réduire le clutter, tout en préservant les signatures des mines, même lorsque celles-ci sont noyées dans le clutter. L'intérêt de ce filtre est que ses paramètres ne dépendent pas des propriétés physiques du milieu de propagation mais des paramètres d'enregistrement du GPR ( $\nu_{ys}$ ,  $\nu_{xs}$ ) et du rayon moyen des signatures des mines antipersonnel  $a$ . Les fréquences de coupure du filtre peuvent être déterminées automatiquement grâce aux relations (2.71), (2.72), (2.75) et (2.76).

## 2.4 Conclusion

Dans ce chapitre deux filtres numériques ont été conçus respectivement pour le filtrage des données Bscan et Cscan. Ceux-ci permettent de réduire significativement le clutter tout en préservant les signatures caractéristiques d'objets enfouis sur ces données. Ainsi, le rapport signal sur clutter augmente lorsqu'un objet est présent, ce qui facilite le processus de détection. Dans des données Bscan et Cscan ainsi prétraitées, de l'information relative à la position des cibles et à leurs profondeurs respectives, peut être extraite.

La détection automatique des positions spatiales et des temps de réponse des mines sur des données Bscan constitue l'objet du prochain chapitre. La détection automatique des positions spatiales des mines sur des données Cscan réelles sera étudié dans le chapitre 4.