

La détection de cibles mobiles sur les images SAR

Mobile Target Detection on SAR Images

par Hubert CANTALLOUBE et Carole NAHUM

Office National d'études et de Recherches Aérospatiales,
BP 72, 92322 Châtillon Cedex, France.
Tél : 01 69 93 62 12/4, Fax : 01 69 93 62 69,
E-mail : cantallo@onera.fr / nahum@onera.fr

résumé et mots clés

La synthèse de plusieurs vues en imagerie SAR permet une diminution du bruit de speckle par sommation incohérente. Nous exposons dans ce document une méthode pour la détection des cibles mobiles fondée sur l'imagerie SAR multi-vues. Le principe est de calculer un ensemble de vues panoramiques pour des valeurs différentes du Doppler et de détecter par des techniques de traitement d'image classiques, des échos dont la position et/ou l'intensité varient d'une vue à l'autre.

La méthode est illustrée par de nombreux exemples. Les signaux bruts ont été obtenus au cours d'une campagne de mesure de la station RAMSÈS réalisée à l'ONERA.

L'étude des limitations théoriques montre que les méthodes de MTI plus classiques comme le filtrage Doppler (détection des cibles à vitesse radiale) ou les transformées temps-fréquence (détection des échos de pente Doppler atypique pour la mise en évidence de mouvements transversaux) ont un lien avec la méthode multi-vues proposée ici.

SAR (radar à synthèse d'ouverture), cibles mobiles, MTI, compensation de mouvement, multi-vues.

abstract and key words

The synthesis of multiple look SAR images allows for speckle noise reduction through non-coherent summing. We present here a method for detection and localisation of moving targets derived from multiple look imaging. Its basis is to compute several single-look pushbroom images, then to search for pointwise reflections whose location and/or intensity vary from look to look.

The approach is validated with several examples. Raw signals were acquired with the RAMSES airborne experimental radar of the ONERA, during a MTI test-flight.

Theoretical limitation studies show the strong link between the multi-look method and more conventional MTI technics such as Doppler filtering (for radially moving targets) and time-frequency transforms (for detecting cross-range motions through their difference in Doppler frequency slope)

SAR (synthetic aperture radar), moving targets indication, MTI, motion compensation, multi-look.

1. introduction

La synthèse de plusieurs vues est couramment utilisée dans le traitement SAR (voir annexe), puisque leur sommation incohérente réduit le bruit de speckle. La multiplicité des vues est rendue possible par la simulation de plusieurs antennes synthétiques successives pendant la durée d'illumination d'un point au sol. Néanmoins, l'ouverture de chaque antenne synthétique étant plus étroite, ceci se fait au prix d'une diminution de la résolution

en azimut par rapport à la résolution ultime, obtenue pour une ouverture seulement limitée par l'illumination. Cette technique est dénommée multi-vues ou *multi-look* temporelle.

Le principe de la détection des cibles mobiles par comparaison des vues exposé ici, comporte deux phases. Il consiste à calculer un ensemble de vues panoramiques pour des valeurs différentes du Doppler (c'est-à-dire de l'angle de déport) et à détecter ensuite au moyen de techniques de traitement d'image plus classiques des objets dont la position varie d'une vue à l'autre. En effet, une vue obtenue avec une fréquence Doppler plus élevée correspond à une image prise plus en avant du porteur donc plus tôt dans le temps.

Une succession de vues de fréquences Doppler décroissantes correspond en quelque sorte à un « film » obtenu au cours des quelques secondes d'illumination du terrain.

En réalité, les choses sont loin d'être aussi simples qu'il n'y paraît.

– Tout d'abord, les différentes lignes d'une vue panoramique correspondent à des instants différents, le temps n'est donc pas homogène sur toute la vue (à la différence d'un film en optique).

– Plus problématique est le fait que le processus de synthèse des vues exploite justement l'immobilité du terrain pour la mise au point, et par conséquent tout mouvement de la cible interfère avec le processus de synthèse. Cette interférence se traduit par une confusion entre le Doppler dû au mouvement propre de la cible et celui dû au mouvement du porteur, ce qui entraîne une mauvaise localisation de la cible dans l'image et par là même une mauvaise focalisation de la cible.

– Enfin, cette erreur sur la localisation se traduit, pour certaines orientations de la vitesse propre de la cible par rapport à la ligne de vol, par une différence entre le déport sous lequel celle-ci est imagée et le déport sous lequel le terrain est imagé. Cette différence de déport peut être suffisante pour que la cible soit peu illuminée par rapport au terrain ou réciproquement.

C'est d'ailleurs ce dernier point qui est exploité dans les techniques s'appuyant sur la différence de Doppler entre le fond et la cible [2]. Le comportement des cibles mobiles au travers du traitement multi-vues a été étudié dans [3]. Son analyse des vitesses radiales y masque le fait que les positions du point mobile ne se distinguent pas des points de l'environnement. Au premier ordre, seule la composante de vitesse longitudinale pourra être détectée, comme cela a été montré dans [1].

L'analyse cinématique plus fine présentée ici, démontre qu'effectivement la seule information de phase permet de déterminer seulement trois des quatre paramètres définissant un mouvement rectiligne uniforme sur le sol. Le degré de liberté restant est la composante de la vitesse de la cible orthogonale à la ligne de vol du porteur. Il est possible de déterminer ce dernier paramètre cinématique en mesurant le déport réel de la cible lorsqu'elle est imagée. Une solution consiste à comparer la courbe de rétrodiffusion de la cible en fonction de la vue avec celles obtenues pour différentes hypothèses sur la vitesse transversale. Cette méthode n'a de fait qu'une précision angulaire de l'ordre de la largeur à 3dB du lobe de l'antenne réelle.

Une meilleure solution consisterait à utiliser une antenne deux voies (ou plus) séparées horizontalement pour mesurer après coup l'angle de déport d'une façon précise.

Un autre type de méthode, proposé dans [4], s'attache au mouvement de l'ombre du véhicule. Celle-ci n'est pas affectée par le décalage Doppler, et l'on peut envisager sa détection par contraste négatif. L'efficacité de cette méthode demande cependant à être prouvée pour des données réalistes, en particulier si les dimensions de l'ombre sont faibles et que le déplacement de l'ombre pendant l'intégration est tel qu'aucun point du sol n'est totalement obscurci pendant toute la durée d'intégration.

La première partie de ce document expose la méthode de détection des cibles mobiles par comparaison des vues. La seconde l'illustre et la valide sur une configuration et des données réelles. La dernière partie analyse ses performances et ses limitations.

2. description de la méthode

2.1. géométrie du problème

Le mouvement rectiligne uniforme de véhicules sur un sol plan est décrit par quatre paramètres de position et de vitesse. Nous utiliserons ici la position (x_0, y_0) de la cible au moment où elle se trouve à 90° de la trajectoire de l'antenne radar, le module V et l'orientation θ de sa vitesse propre. La figure 1 explicite les conventions d'orientation utilisées, avec l'axe des y à la verticale de la trajectoire de l'antenne et l'axe des x horizontal et orthogonal à l'axe des y . L'altitude, supposée constante, de l'antenne sera notée H , la position générique de la cible sera donc $(x_c, y_c, 0)$ et celle correspondante de l'antenne sera $(0, y_a, H)$.

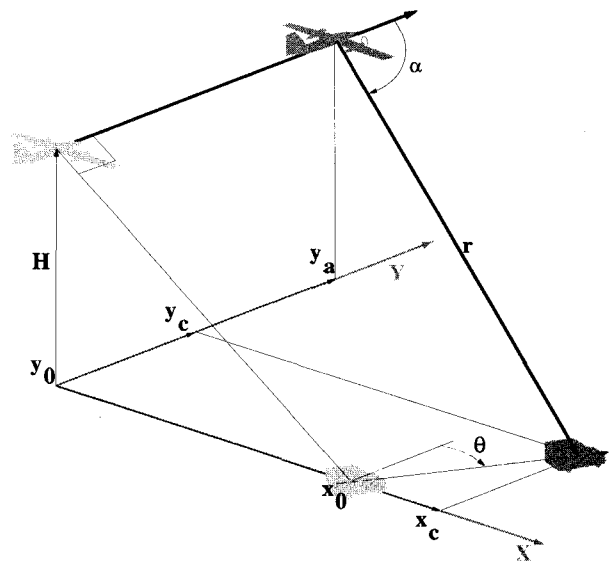


Figure 1. – Géométrie de l'imagerie SAR d'une cible mobile.

Le déport apparent α sera défini comme l'angle entre la trajectoire de l'antenne et la direction du point observé au sol. Pour chaque vue panoramique, ce déport α sera constant et relié à la fréquence Doppler f par :

$$\cos(\alpha) = \frac{c \cdot f}{2F \cdot V_a} \quad (1)$$

Avec F la fréquence porteuse, c la vitesse de la lumière et V_a la vitesse de translation de l'antenne (qui n'est pas loin d'être rectiligne uniforme).

Le déport réel α_c d'une cible mobile sera l'angle entre la trajectoire de l'antenne et la direction de la cible au moment où sa fréquence Doppler f sera égale à celle du sol.

Pour simplifier les notations, la vitesse V_a de l'antenne sera considérée comme unité ($y_a - y_0$ est donc assimilable au temps

écoulé depuis le passage de la cible dans le plan normal à la trajectoire de l'avion), nous rechercherons $v = \frac{V}{V_a}$.

A tout instant, c'est-à-dire quand la position de l'antenne est y_a , les coordonnées de la cible sont données par :

$$\begin{cases} x_c = x_0 + v \cdot \sin(\theta)(y_a - y_0) \\ y_c = y_0 + v \cdot \cos(\theta)(y_a - y_0) \end{cases} \quad (2)$$

La distance antenne-cible s'écrit :

$$r^2 = (x_0 - v \cdot \sin(\theta)(y_0 - y_a))^2 + (y_0 - y_a)^2 (1 - v \cdot \cos(\theta))^2 + H^2$$

soit en développant :

$$r^2 = x_0^2 - 2v \cdot \sin(\theta)x_0(y_0 - y_a) + v^2 \sin^2(\theta)(y_0 - y_a)^2 + (y_0 - y_a)^2 (1 - 2v \cdot \cos(\theta) + v^2 \cos^2(\theta)) + H^2$$

ou encore :

$$r^2 = x_0^2 - 2v \cdot \sin(\theta)x_0(y_0 - y_a) + (1 - 2v \cdot \cos(\theta) + v^2)(y_0 - y_a)^2 + H^2 \quad (3)$$

qui sera mise sous la forme :

$$r^2 = A_1 y_a^2 + 2B_1 y_a + C_1 \quad (4)$$

Pour faire le lien avec la position de la cible dans la i -ième vue de déport α_i donné (et donc de fréquence Doppler f_i), il faut exprimer que la vitesse radiale de la cible par rapport à l'antenne induit un effet Doppler de la même fréquence f_i . On remarquera que le déport réel de la cible (que l'on calculera plus loin) n'est pas forcément égal à α_i en raison justement du mouvement de la cible. Ceci car la synthèse de la vue consiste en première approximation en un filtrage passe-bande autour de f_i .

Or, la dérivée partielle de r par rapport à y_a s'obtient aisément puisque :

$$\frac{\partial r}{\partial y_a} = \frac{1}{2r} \frac{\partial (r^2)}{\partial y_a} \quad (5)$$

et donc à partir de la formule (3) :

$$\frac{\partial r}{\partial y_a} = \frac{v \cdot \sin(\theta)x_0 - (1 - 2v \cdot \cos(\theta) + v^2)(y_0 - y_a)}{r}$$

La condition que la fréquence Doppler f_i de la cible soit celle du sol s'exprime par :

$$\frac{\partial r}{\partial y_a} = -\cos(\alpha_i)$$

soit encore :

$$r \cdot \cos(\alpha_i) = (1 - 2v \cdot \cos(\theta) + v^2)(y_0 - y_a) - v \cdot \sin(\theta)x_0 \quad (6)$$

Cette condition peut s'écrire sous la forme :

$$r \cdot \cos(\alpha_i) = -A_2 y_a - B_2 \quad (7)$$

Le développement de (3) et (6) montre que :

$$\begin{cases} A \triangleq A_1 = A_2 = 1 - 2v \cdot \cos(\theta) + v^2 \\ B \triangleq B_1 = B_2 = v \cdot \sin(\theta)x_0 - A y_0 \\ C \triangleq C_1 = x_0^2 - 2v \cdot \sin(\theta)x_0 y_0 + A y_0^2 + H^2 \end{cases} \quad (8)$$

Les positions apparentes de la cible sur les différentes vues seront notées (r_i, y_i) où y_i désigne la valeur de y_a pour la ligne de la i -ième vue sur laquelle se trouve la cible. Si les vues ont été mises en correspondance géométrique par une torsion appropriée (pour compenser la variation de déport d'une vue à l'autre), la correspondance entre les coordonnées cartésiennes (c_i, l_i) - numéro de ligne et numéro de colonne - et les coordonnées (r_i, y_i) est donnée par :

$$\begin{cases} r = \frac{\Delta_c}{\sin(\alpha)} \cdot c + \frac{C_o}{\sin(\alpha)} \\ y = \Delta_l \cdot l + \frac{\Delta_c}{\text{tg}(\alpha)} \cdot c + \left(L_o + \frac{C_o}{\text{tg}(\alpha)} \right) \end{cases}$$

où Δ_c et Δ_l sont les dimensions en abscisse et en ordonnée d'un pixel et d'autre part, C_o et L_o donnent la position, figure 2, du coin $(0, 0)$ de l'image.

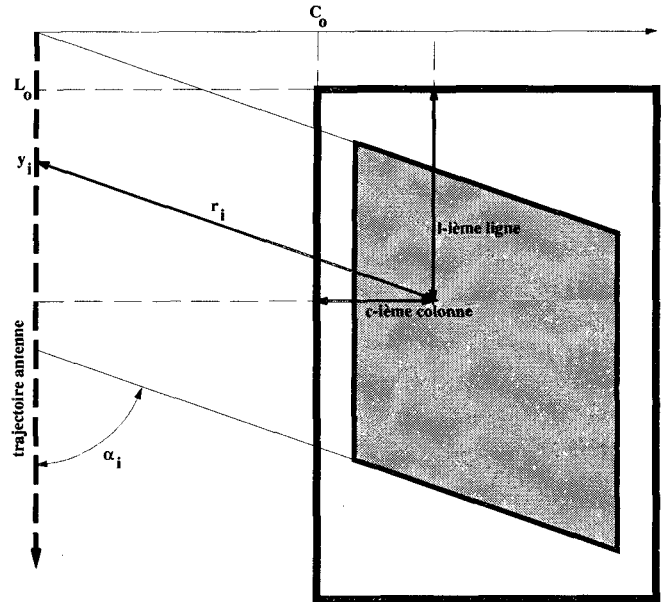


Figure 2. - Passage des coordonnées sur une image rectifiée vers les coordonnées distance \times temps.

2.2. objectifs et formulation mathématique

La détection et la localisation des cibles mobiles consistent à estimer des paramètres A , B et C à partir de mesures de positions (r_i, y_i) sur différentes vues, c'est-à-dire pour différentes valeurs de α_i . Cette estimation permettra de prédire la position apparente de la cible sur une autre vue, pour éventuellement enrichir avec d'autres mesures l'estimation initiale. Comme il reste un degré de liberté, dans le problème de la détermination des inconnues du mouvement x_0, y_0, v et θ , en fonction de A, B et C , on paramètrera les solutions par la composante transversale $v \cdot \sin(\theta)$ de la vitesse propre de la cible. Le déport réel α_{ci} sera déterminé en fonction

de l'hypothèse faite sur $v \cdot \sin(\theta)$ de façon à permettre de lever l'ambiguïté sur cette composante de la vitesse. Pour finir, les positions réelles des cibles dans chaque vue seront calculées pour visualiser la trajectoire réelle de la cible.

Pour estimer les coefficients A , B et C , il suffirait d'ajuster une courbe du second degré fonction de y à r^2 et d'identifier les coefficients avec ceux de (4). On peut aussi ajuster linéairement y à $r \cdot \cos(\alpha)$ pour obtenir les estimations des coefficients A et B de (7) et calculer la moyenne de $r^2 - A \cdot y^2 - 2B \cdot y$ pour estimer C . Expérimentalement, le second procédé indirect est numériquement plus stable que le premier.

La prédiction d'une nouvelle position apparente (r, y) de la cible sur une autre vue, c'est-à-dire pour une autre valeur de α se calcule simplement, car la substitution de (7) dans (4) donne :

$$r = \sqrt{\frac{AC - B^2}{A \cos(\alpha)^2}} \quad (9)$$

Et y est obtenu par substitution de r dans (7).

Une fois les coefficients A , B et C estimés sur un ensemble maximal de vues, les solutions pour les paramètres cinématiques s'écriront comme une fonction de la composante transversale $v \cdot \sin(\theta)$ de la vitesse propre. En effet, la première ligne de (8) fournit la valeur de la composante longitudinale $v \cdot \cos(\theta)$ car elle peut se réécrire :

$$A - (v \cdot \sin(\theta))^2 = (1 - v \cdot \cos(\theta))^2$$

Sous la condition généralement admise $0 \leq v < 1$ (sinon, la cible se déplace plus vite que le capteur, et on parlera plutôt d'ISAR que de SAR) la seule solution ayant un sens physique est :

$$v \cdot \cos(\theta) = 1 - \sqrt{A - (v \cdot \sin(\theta))^2}$$

La substitution de la deuxième ligne de (8) dans la dernière se simplifie en :

$$AC = x_0^2 (A - v^2 \sin(\theta)^2) + B^2 + AH^2$$

dont la solution physique (l'autre étant du côté opposé au côté observé) est :

$$x_0 = \sqrt{\frac{AC - AH^2 - B^2}{A - v^2 \sin(\theta)^2}}$$

se déduit immédiatement de la deuxième ligne de (8) :

$$y_0 = \frac{v \cdot \sin(\theta)x_0 - B}{A}$$

Le déport réel α_c de la cible s'en déduit rapidement puisque d'après la figure 1 :

$$y_c - y_a = r \cdot \cos(\alpha_c) \quad (10)$$

dont en substituant l'expression de y_c dans (2) on tire l'expression du déport réel de la cible dans la vue i :

$$\cos(\alpha_{ci}) = \frac{(y_0 - y_i)(1 - v \cdot \cos(\theta))}{r_i} \quad (11)$$

Ce déport réel est nécessaire pour lever l'ambiguïté sur la composante transversale $v \cdot \sin(\theta)$ de la vitesse. L'utilisation qui en est faite dépend du matériel disponible :

- Si l'on ne dispose que d'une antenne à une voie, connaissant l'attitude de l'antenne, on peut calculer, pour chaque hypothèse sur $v \cdot \sin(\theta)$, l'écart entre l'axe du lobe d'antenne et la direction de la cible. On calculera, pour chaque hypothèse sur $v \cdot \sin(\theta)$ une courbe de l'intensité rétrodiffusée prévisible en fonction de la vue. En comparant les courbes obtenues avec la courbe d'intensité effective de la cible, mesurée sur les vues, on déterminera la meilleure hypothèse sur $v \cdot \sin(\theta)$.

- Si l'on dispose d'une antenne à deux voies séparées longitudinalement, on pourra, en fonction du déport effectif et de la vitesse de l'antenne dans l'espace, prédire¹ le déphasage entre les deux voies de l'écho de la cible, pour chaque vue et chaque hypothèse sur $v \cdot \sin(\theta)$. La meilleure hypothèse sera celle qui minimise, sur l'ensemble des vues, l'énergie rétrodiffusée par l'antenne composite obtenue en additionnant, de façon cohérente, les deux voies avec le déphasage prédit augmenté de π . C'est-à-dire que l'on cherchera à former un diagramme d'antenne qui ait un zéro dans la direction de la cible, car il est plus précis de localiser un passage par zéro qu'un maximum.

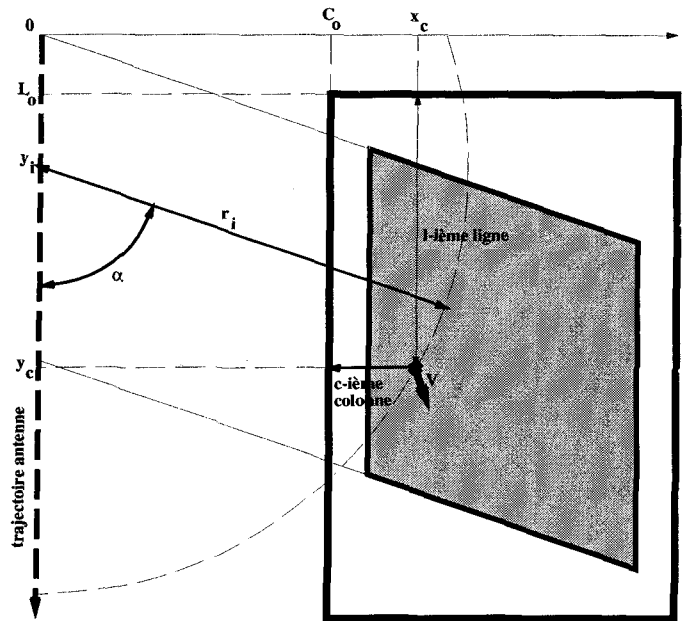


Figure 3. - Repositionnement de la cible sur une vue SAR.

La position réelle sur la i -ième vue se déduit aisément de (10) et (11) qui donnent :

$$y_c = y_a + (y_0 - y_i)(1 - v \cdot \cos(\theta))$$

1. Sous une hypothèse de sol plan, voire éventuellement avec un modèle de l'élévation du terrain.

Donc d'après la figure 3 on a :

$$x_c = \sqrt{r_i^2 - (y_i - y_c)^2}$$

Et les positions réelles de la cible dans l'image sont donc :

$$\begin{cases} c = \frac{x_c - C_0}{\Delta_c} \\ l = \frac{y_c - L_0}{\Delta_l} \end{cases}$$

2.3. détails algorithmes

Les vues de départ sont calculées chacune pour un angle de déport constant sur la vue, sous l'hypothèse d'un sol plan et d'une trajectoire d'antenne horizontale. Dans le cas d'un radar aéroporté, cela ne correspond pas exactement à une fréquence Doppler constante, en raison de la compensation de mouvement. Un autofocus destiné à compenser l'inévitable dérive de la centrale inertielle est aussi appliqué en préalable à la synthèse de vues. Les procédés de compensation de mouvement, d'autofocus et de synthèse des vues sont détaillés dans [5], [6] et [7].

Pour déterminer les cibles mobiles, nous avons d'abord détecté sur chaque vue des points brillants isolés par un seuillage adaptatif assez tolérant. Le principe du filtre est de retenir les points dont l'amplitude rétrodiffusée est simultanément :

- supérieure à celle de tous les points d'un voisinage rectangulaire,
- supérieure à un seuil proportionnel à l'amplitude du point le plus brillant dans un voisinage deux fois plus grand (bien sûr, les points du premier rectangle exclus).

Les paramètres du seuillage sont les dimensions du rectangle et le facteur de proportionnalité. Nous avons utilisé la valeur de 3 dB pour ce dernier. Une valeur trop forte éliminerait les cibles les moins contrastées par rapport à leur environnement apparent. Une valeur trop faible augmenterait le nombre de fausses alarmes et rendrait très inefficace le filtrage/pistage qui suit cette étape. En dépit de son apparente simplicité, le seuillage adaptatif est, de loin, la tâche la plus consommatrice du point de vue informatique². On pourrait envisager l'utilisation de techniques de détection plus fines, comme par maximum de vraisemblance, sachant que cela sous-entend, pour la mise en pratique, une segmentation de la scène en régions homogènes d'occupation du sol, une connaissance de la statistique de la SER de la cible, et la prise en compte de la défocalisation.

Une fois extraits les points brillants isolés (ou *plots*), il faut rechercher sur la succession des vues, pour un ensemble de déports α_i croissants, des successions de plots dont les positions respectives correspondent à un mouvement rectiligne uniforme au sol. Le procédé suivant a été retenu, même s'il paraît de prime

abord coûteux d'un point de vue informatique, car il est bien moins coûteux que l'étape précédente.

Il faut d'abord borner le déplacement apparent des plots d'une vue à l'autre en fonction de l'espacement en déport (ou en fréquence Doppler) des vues, de la vitesse propre maximale des cibles et de la géométrie de la prise de vue. En fait, le déplacement d'une vue à la suivante ainsi que la différence de déplacement sur trois vues successives (en quelque sorte la « courbure » de la trajectoire apparente de la cible) sont bornés en azimuth et en distance.

On considère, pour chaque plot d'une vue n , tous les plots de la vue $n - 1$ à l'intérieur des bornes de déplacement apparent. Pour chaque paire de plots sur les vues $n - 1$ et n , on recherche, dans la vue $n + 1$, les plots situés dans l'intersection du voisinage du premier plot avec les premières bornes et du voisinage de la position symétrique du second par rapport au premier avec les secondes bornes. Ce procédé, illustré sur la figure 4, fournit des triplets de plots qui satisfont aux bornes sur le déplacement apparent. Pour ces triplets, on vérifie que le calcul des trois invariants cinématiques A, B, C est possible, ce qui permet d'éliminer environ la moitié des triplets. On éliminera aussi les triplets pour lesquels $\sqrt{A-1} > v_{\max}$ la vitesse propre maximale des cibles recherchées, car d'après (8) cette expression correspond à la vitesse propre minimale, obtenue pour une composante transversale nulle. Les autres triplets sont retenus comme « germes » des pistes.

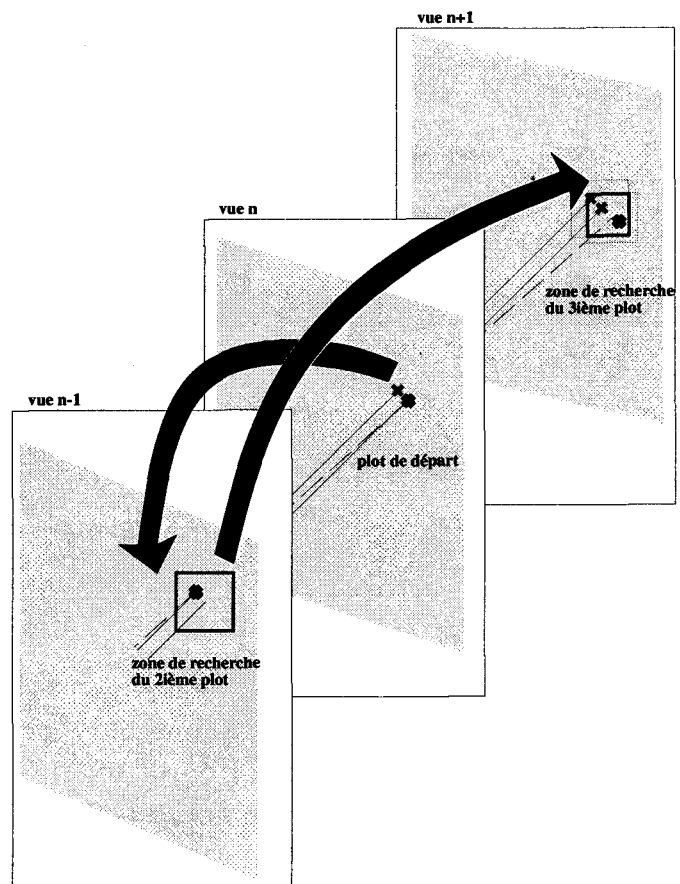


Figure 4. - Procédé de recherche des germes de pistes.

2. Le seuillage adaptatif est néanmoins une tâche plus légère que la synthèse des vues à partir des signaux radar bruts.

L'étape suivante est la prolongation des germes de pistes sur l'ensemble des vues. Cette opération est faite pour chaque germe successivement, les germes étant préalablement classés par ordre de brillance³ de leurs plots. A partir des trois vues du germe, on ajoute un par un des plots des vues suivantes ou précédentes pour prolonger la piste. A chaque itération, le plot additionnel est recherché au voisinage de la position prédite de la cible dans la nouvelle vue à partir des invariants cinématiques A, B, C évalués avec les plots déjà intégrés dans la piste. Si un plot est trouvé à une distance de la prédiction compatible avec les erreurs de positionnement, il est ajouté à la piste. L'estimation de A, B, C est ensuite mise à jour avec le nouvel ensemble de plots. Dans le cas contraire, on continue la recherche directement sur la vue suivante. Une fois que toutes les vues sont explorées, les germes non traités contenus dans la piste sont éliminés, de façon à ne pas recalculer plusieurs fois la même piste.

En fin de traitement, les pistes trop courtes (en termes de nombre de vues dans lesquelles la cible a été extraite) sont éliminées. Les pistes restantes correspondent aux suites de points brillants isolés qui sont cinématiquement compatibles avec une cible en déplacement horizontal uniforme avec une vitesse inférieure à la vitesse maximale souhaitée. En particulier à ce point là du traitement, la majorité des pistes correspondent à des points fixes sur le sol !

Il va de soi, que la méthode tirerait un grand profit de techniques de pistage multi-cibles comme le filtre à association probabiliste des données [9] [10], voire mieux par un filtre non Gaussien comme un filtre à diffusion numérique [11] ou par particules [12]. Le fait que la méthode donne déjà des résultats probants avec la technique de pistage la plus sommaire, permet de tirer des conclusions sur sa pertinence, ce qui est notre objectif ici.

La dernière étape, l'estimation du déport réel a été faite sur les signaux traités avec la seule voie d'antenne disponible. Nous avons comparé, par corrélation normée, les valeurs de rétrodiffusion des plots composant une piste avec une illumination « théorique » calculée pour différentes hypothèses de vitesse orthogonale à la ligne de vol. Nous avons utilisé les informations disponibles sur le pointage d'antenne (centrale inertielle) et sur la forme du lobe d'antenne. Nous avons aussi effectué des essais en estimant le pointage, et principalement l'angle de dérive du porteur (avion) à partir de la rétrodiffusion modale⁴ d'une vue entière. Il est même possible d'estimer un écart de déport entre la cible et le sol, en l'absence de données sur le lobe d'antenne et sur l'angle de dérive, en comparant directement les courbes de rétrodiffusion des cibles avec celle des valeurs modales de chaque vue.

3. L'ordre utilisé est le suivant : on compare d'abord les plots les plus brillants de chaque germe, s'il sont de même brillance (ce qui est en particulier le cas s'il s'agit du même plot présent dans les deux germes), on compare les deux plots médians de chaque germe, et s'il sont de même brillance, on compare les plots les plus sombres.

4. Le mode est moins altéré que la moyenne par la présence de réflecteurs ponctuels ou linéaires intenses sur la vue. En effet, ces derniers sont généralement moins isotropes que les réflecteurs surfaciques, c'est-à-dire que leur section efficace fluctue fortement avec l'angle de présentation, donc avec le déport. Mais, si les échos ponctuels et linéaires peuvent avoir une rétrodiffusion très élevée, ils n'occupent qu'une portion infime des pixels de la vue. Le mode permet donc une meilleure estimation de l'illumination du sol en fonction du déport.

3. validation de la méthode

3.1. contexte expérimental

La méthode précédemment décrite, a été validée sur des signaux acquis à l'aide du radar aéroporté expérimental RAMSÈS de l'Office National d'études et de Recherches Aérospatiales. Trois survols de la piste de l'ancienne base aérienne de l'OTAN à Dreux ont été effectués alors que deux automobiles se déplaçaient en sens contraire et à vitesse connue le long de la piste. Les trois mesures correspondent à un passage le long de la piste, un passage à 45° de l'axe de la piste et un passage perpendiculairement à l'axe de la piste.

Le radar RAMSÈS, installé sur un bimoteur TRANSALL, enregistre les signaux bruts de un ou plusieurs modules haute fréquence montés face à la porte latérale. Les signaux enregistrés (multi-fréquences, multi-polarisations ou interférométriques selon les modules installés) sont traités en temps différé pour permettre d'expérimenter des algorithmes. Le tableau 1 consigne les caractéristiques de cette mission, pertinentes pour notre étude.

Tableau 1. – Caractéristiques des signaux utilisés.

Altitude sol	2500 m
Distance d'observation	5590 m (en milieu de fauchée)
Déport de l'antenne	90° (à droite de la ligne de vol)
Site de l'antenne	-25° (sous l'horizon)
Ouverture angulaire	6° (à 3 dB, cornet rainuré)
Vitesse de translation	80 m/s (environ 300 km/h)
Dérive	+7° -1,1° +3,8° (passages à 0°, 90° et 45° resp.)
Voies haute fréquence	bande Ku (1 polarisation émise, 2 reçues ^(*)) et bande X
Fréquence porteuse	14,33 GHz (bande Ku)
Modulation	rampe linéaire de fréquence
Résolution distance	1,2 m (à 3 dB, soit 110 MHz de bande)
Ambiguïté Doppler	4,167 kHz

(*) seule une polarisation de la bande Ku est utilisée pour cette étude.

Pour situer le cadre de l'expérience, la figure 5 est un composite de trois images 4-vues obtenues à partir des signaux des trois passages. Pour chaque passage, nous avons effectué deux essais de recherche de cibles mobiles, sur des vues calculées avec un pas en distance de 1,3 m et des pas en azimut de 7 m et 1,3 m respectivement. Dans le premier cas, dix vues, séparées de 400 Hz pour une largeur de 8 Hz, sont calculées pour couvrir toute l'ambiguïté Doppler. Dans le second cas, neuf vues presque

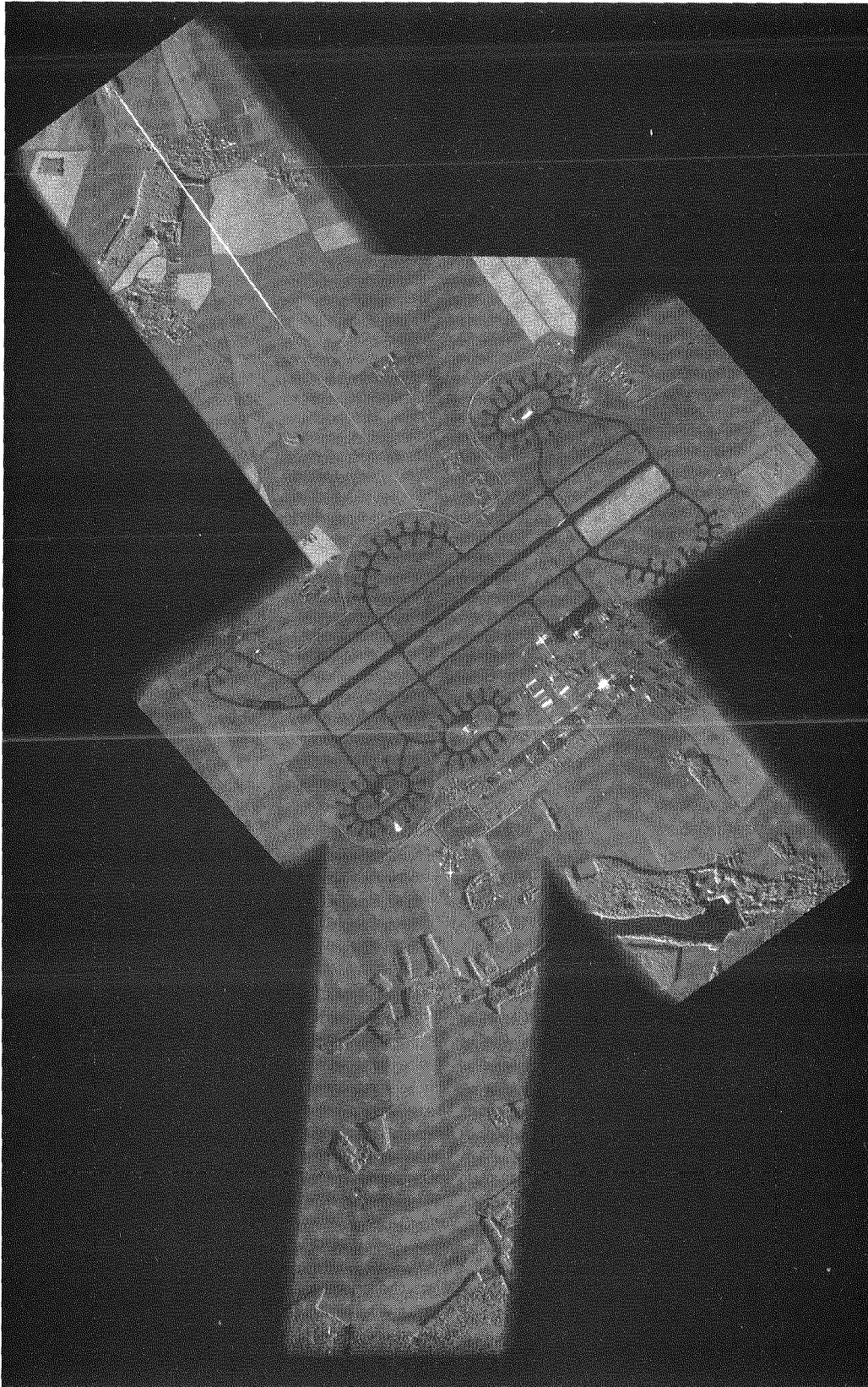


Figure 5. – Composite des trois passes utilisées pour cette expérience.

jointives, séparées de 100 Hz et d'une largeur spectrale de 60 Hz sont calculées. Toutes les images sont calculées à déport constant, dans le repère distance \times azimut de la figure 2 avec compensation des mouvements du porteur et correction des dérives de la centrale inertielle par autofocus.

3.2. cas de la vitesse longitudinale pure

Ce cas est celui pour lequel l'intérêt de la méthode est le plus patent. C'est en effet le plus délicat à traiter par les techniques classiques de filtrage Doppler car la cible ne subit pratiquement pas d'aberration Doppler du fait de son mouvement propre.

3.2.1. essai à résolution réduite en azimut

La motivation des essais à cette résolution, est que la défocalisation d'une cible à vitesse maximum étale son image sur 7 m environ. Il peut donc paraître inutile de calculer une image plus finement résolue. D'autre part, si l'on couvre toute l'ambiguïté Doppler, la cible sera visible sur un intervalle Doppler assez long pour que le déplacement en azimut soit décelable même à cette résolution.

La figure 6 montre les dix vues utilisées, l'avion y défile de gauche à droite au dessus de l'image. Pour ce survol le long de la piste, les deux cibles sont visibles sur les vues centrales (au voisinage du Doppler nul). Les vues extrêmes, proches du repliement Doppler, ne contiennent pratiquement que le bruit basse fréquence qui n'est pas filtré sur ces images. Ce bruit apparaît comme une ligne blanche horizontale sur les vues extrêmes. En raison de la compensation des non-linéarités du mouvement de l'avion, cette ligne n'est pas parfaitement droite (migration en distance), ni d'intensité constante (fluctuations de V_a). En effet, chaque vue est calculée pour un déport α constant, la fréquence Doppler effective f , donnée par (1), y varie donc, au cours du temps, au voisinage d'une fréquence Doppler moyenne. La synthèse de la vue sélectionne ainsi une bande de fréquence étroite dans le bruit à basse fréquence, or ce bruit présente des raies spectrales marquées, en particulier à 0, ± 400 et ± 1200 Hz.

La figure 7 suivante montre les plots extraits des six premières vues superposés avec la sixième vue (en dynamique inversée pour faciliter la restitution sur papier). On constate le nombre important de points brillants isolés dans la séquence de vues.

Comme l'espacement de 400 Hz des vues est important, les bornes du mouvement apparent d'une cible de vitesse inférieure à 100 km/h sont assez larges et le nombre de pistes initiées est important : de l'ordre de 30 000 dans cet exemple. La figure 8 montre les triplets compatibles utilisés comme germes de pistage superposés à la sixième vue en négatif.

Par contre après pistage sur les dix vues et élimination des pistes de moins de cinq plots, il ne reste plus que les deux véhicules et des pistes de cibles immobiles. Les échos ponctuels immobiles sont pistés car nous n'avons pas imposé de borne inférieure ni sur le déplacement apparent, ni sur la vitesse des cibles.

L'estimation de la composante transversale de la vitesse, par corrélation des courbes d'illumination, fournit une trajectoire assez proche de l'axe de la piste que longent les véhicules. Sur la figure 10 la trajectoire « réelle » estimée est représentée par un trait épais et les trajectoires « réelles » possibles en fonction du déplacement apparent, donc en fait de l'information de phase seulement, sont indiquées en traits fins.

Les estimations des vitesses transversales des quatre échos fixes du haut de la figure 9 sont très erronées, car la migration distance d'une vue à l'autre les fait sortir, pour les vues centrales, de la bande passante du filtre de dérapage. On pourra constater sur la figure 6 que ces échos sortent des limites horizontales de l'image pour les vues du milieu. La variation d'illumination apparente que cela provoque est interprétée par le programme informatique, qui n'élimine pas les cibles en bordure de bande, comme le signe d'une vitesse radiale élevée⁵.

3.2.2. essai sur des vues rapprochées

Pour cet essai, nous avons sélectionné neuf vues avec un pas de calcul homogène en distance et azimut de 1,3m et un Doppler centré sur le maximum de l'illumination du fond. L'espacement des vues (100 Hz) est un peu moins du double de la largeur de bande Doppler des vues (c'est-à-dire la variation nominale de la fréquence Doppler d'un bout à l'autre de l'intervalle d'intégration en azimut). Sur l'image des plots extraits des six premières vues, figure 11, directement comparable à la figure 7, on voit que les plots correspondant aux cibles mobiles sont plus proches et pratiquement alignés. Cela se traduit sur les initiations de pistes, figure 12, par un nombre beaucoup plus faible de germes. Il est, en effet, beaucoup moins probable que trois plots soient par hasard cinématiquement compatibles avec un mouvement rectiligne uniforme. Si la recherche du second point se fait sur un voisinage quatre fois plus étroit, le voisinage pour le troisième point est pratiquement divisé par 16 en côté (soit 256 en surface).

La figure 13 donne le résultat du filtrage et de l'estimation de la composante transversale de la vitesse. La cible de droite est bien estimée : la trajectoire réelle y est plus courte que sur la figure 10 car les vues y couvrent un intervalle Doppler quatre fois plus étroit. Par contre la trajectoire de la cible de gauche est moins bien estimée probablement en raison de fluctuations de la rétrodiffusion avec la présentation.

L'estimation peu précise de la vitesse transversale de la cible de gauche se comprend bien quand on mesure sa rétrodiffusion sur les neuf vues : La figure 14 montre la courbe de rétrodiffusion du fond sur l'intervalle d'ambiguïté Doppler ($\pm 15^\circ$ en déport) et la courbe de rétrodiffusion de la cible sur les quinze vues espacées de 100 Hz sur lesquelles elle est visible. Les neuf vues utilisées pour l'estimation du mouvement, couvrent un secteur d'environ 3° en déport, soit les neuf points les plus hauts de la courbe A et les points de 400 à 1200 Hz sur la courbe B.

5. Le centre du spectre Doppler de tels échos est donc décalé, et les traitements classiques par filtrage Doppler les considéreraient aussi comme des cibles mobiles. L'imagerie multi-vues permet justement d'éliminer ces fausses alarmes du fait même qu'elles sont en limite d'image.

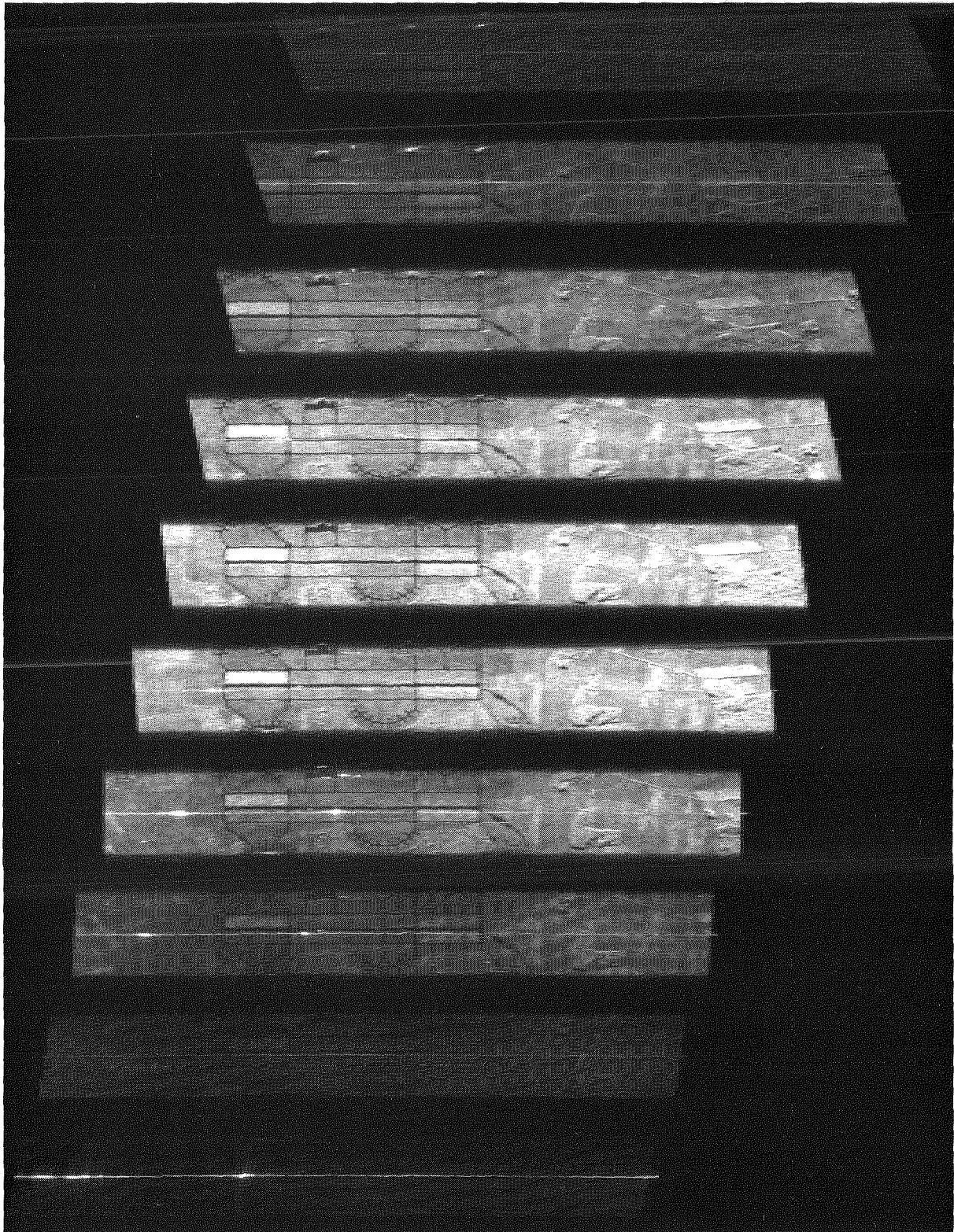


Figure 6. – Les dix vues panoramiques à déport α constant, d'une fréquence Doppler moyenne f couvrant, par pas de 400 Hz, toute l'ambiguïté Doppler de +2400 Hz (haut) à -1200 Hz (bas).

La détection de cibles mobiles sur les images SAR

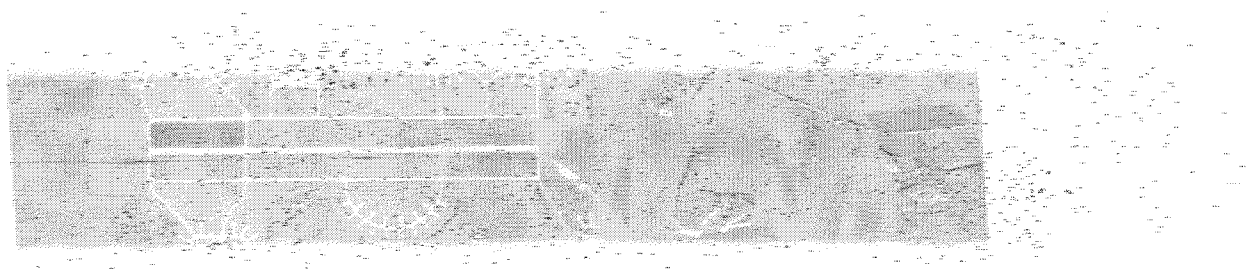


Figure 7. – Plots extraits sur les six premières vues.

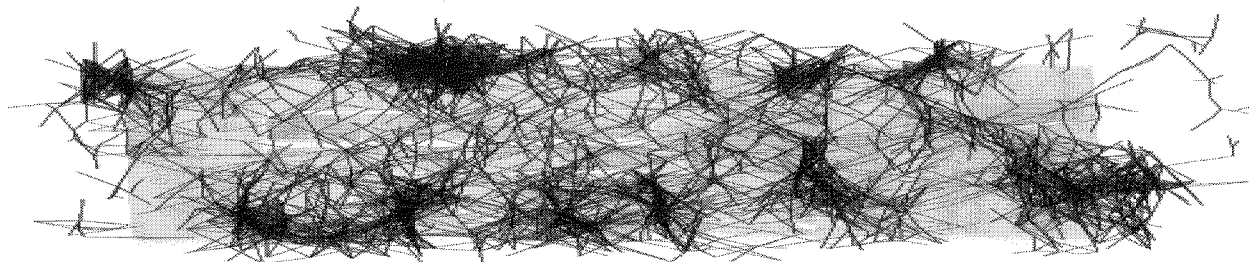


Figure 8. – Initiation des pistes (30 000 germes).

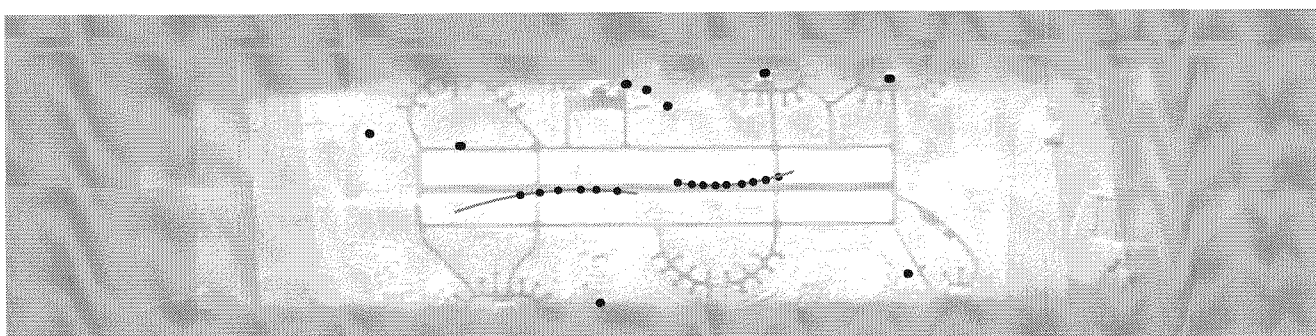


Figure 9. – Pistes filtrées, d'au moins cinq plots cinématiquement compatibles.

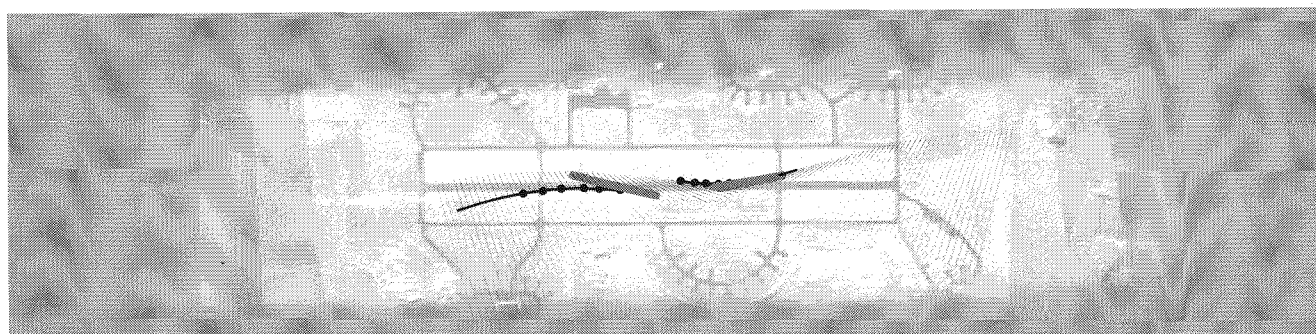


Figure 10. – Résultat du filtrage et de l'estimation de la vitesse transversale (Points=plots mesurés, traits noirs=trajectoires apparentes lissées, traits fins=trajectoires réelles possibles, traits gris=trajectoires réelles estimées).

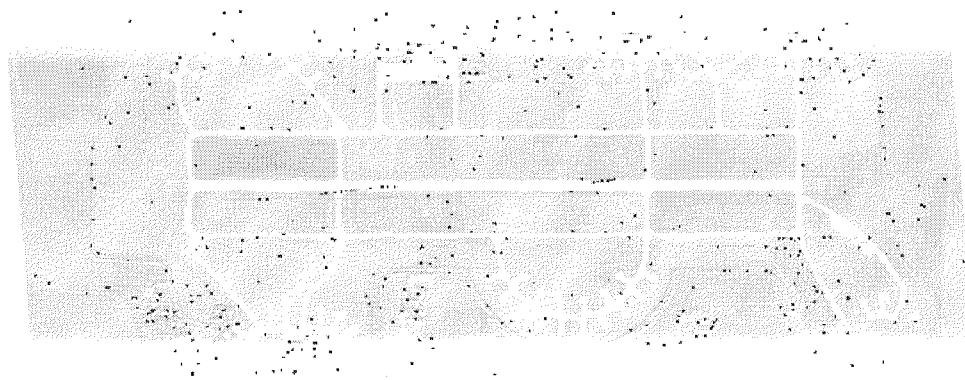


Figure 11. – Plots extraits des six premières vues.

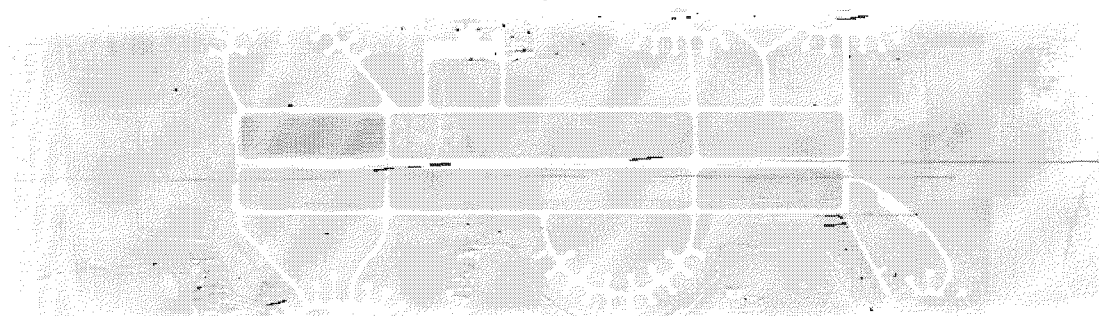


Figure 12. – Initiations des pistes (183 germes).

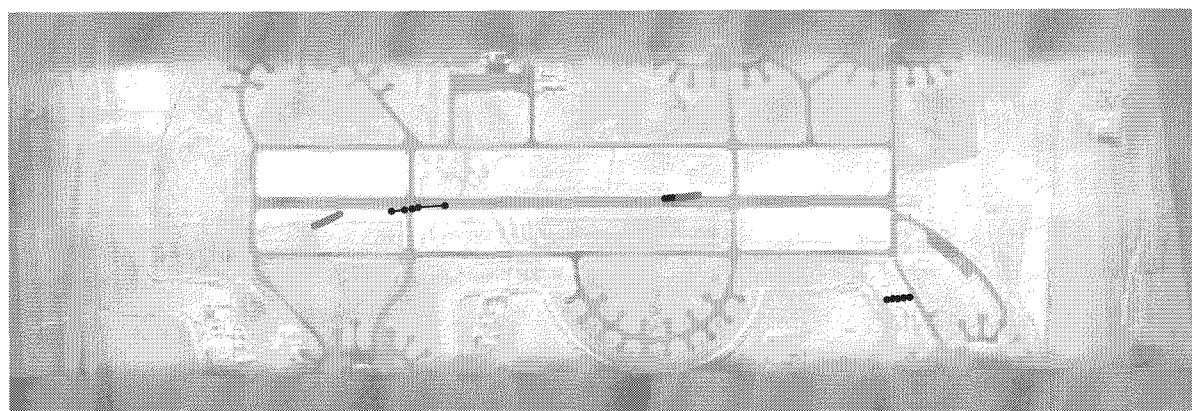


Figure 13. – Résultat du filtrage et de l'estimation de la vitesse transversale. Traits fins=trajectoires possibles, trait épais=trajectoire estimée par corrélation des courbes d'illumination.

3.3. cas de la vitesse à 45° de l'axe du vol

Sur les dix vues à résolution réduite mais qui couvrent toute l'ambiguïté Doppler figure 15, un des véhicules est bien extrait et localisé. Les cinq autres pistes qui correspondent à des mouvements apparents non négligeables, ont un contraste très faible et,

sauf pour deux d'entre elles, correspondent à des plots sur des vues non successives. Par contre, l'autre véhicule n'est pas visible avec un contraste suffisant sur au moins cinq vues. L'essai avec les vues rapprochées figure 16 montre qu'en fait, la cible ne ressort du fond que sur une bande de 600 Hz environ. Elle n'est donc détectée que sur deux des vues à résolution réduite. Aucune des cinq autres pistes n'est retrouvée dans l'essai avec une résolution homogène, qui est normalement plus sensible aux cibles de faible rétrodiffusion.

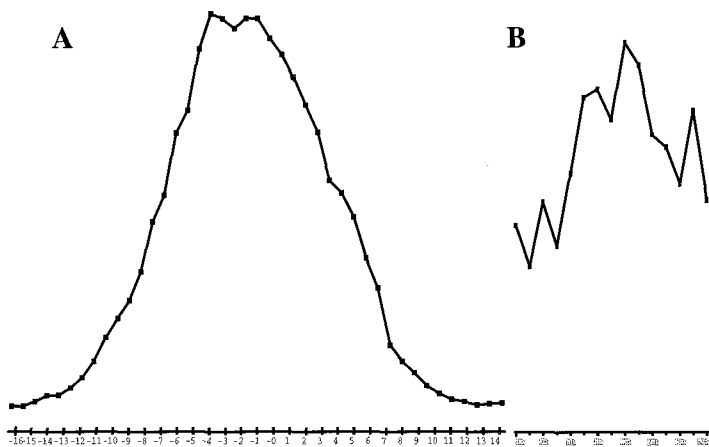


Figure 14. – Comparaison entre l'illumination mesurée du fond (A) et celle de la cible mobile (B).

Sur les vues rapprochées, les deux véhicules sont extraits et l'estimation des trois invariants cinématiques est correcte. Mais la cible la moins visible est pistée selon deux traces très proches, par le filtrage très sommaire utilisé ici, probablement en raison du rapport signal/bruit défavorable⁶.

On voit sur la figure 16, que trois des quatre paramètres du mouvement sont bien estimés, au fait que pour les deux véhicules, l'une des trajectoires possibles (traits fins) est bien sur la piste avec une vitesse proche de 12m/s. Par contre, l'estimation de la composante transversale de la vitesse propre est mauvaise pour les deux cibles. Pour l'une d'elles, la corrélation entre la courbe de rétrodiffusion calculée et celle mesurée est toujours négative. L'inefficacité de l'estimation du décalage Doppler sur la bande de 900 Hz couverte par les vues, est due à la composante transversale de la vitesse. Celle-ci altère le déport réel de la cible par rapport au sol au point que le maximum d'illumination se trouve au delà de la bande Doppler explorée.

3.4. cas de la vitesse transversale pure

Sur les vues à résolution réduite, les deux véhicules sont détectés et poursuivis sur 6 et 7 vues respectivement avec un déplacement apparent de 7 ou 8 pixels en azimut et de 4 ou 5 pixels en distance. Ce mouvement apparent, certes faible, les différencie de la plupart des échos fixes.

La première cible est extraite en huitième position par ordre d'énergie décroissante. Visible sur six vues, l'aberration Doppler la porte sur une surface uniforme (pelouse) et sa vitesse radiale est estimée à $-13,3 \pm 1,7$ m/s, avec une corrélation à 96% entre des courbes d'illumination calculée et mesurée. Comparativement, la corrélation est de 82% pour la vitesse propre réelle (-11 m/s) du véhicule. L'erreur correspondante sur le déport est de $1,5^\circ$, avec comme conséquence un positionnement à 140 m de la position réelle. Par contre, la seconde cible,

6. Il est possible que la section efficace radar du véhicule (une estafette Renault) soit faible sous la présentation trois-quart avant gauche.

extraite en 14^{ème} position, est reportée sur une région moins homogène, à la limite d'une zone de faible rétrodiffusion (parking pour véhicules) à proximité d'un des parkings avions. Cela ne nuit pas à sa poursuite, mais sa vitesse transversale est estimée de façon erronée à +2 m/s. La corrélation entre illumination et rétrodiffusion y atteint 88% contre 4% pour la « bonne » valeur (+11 m/s).

La recherche des cibles mobiles sur les vues rapprochées figure 18 est beaucoup moins favorable pour cette orientation des vitesses propres. Le déplacement apparent de telles cibles est très faible. Elles se confondent presque, du point de vue de leurs positions apparentes, avec les échos isolés fixes et seules leurs variations d'éclairement pourront les différencier.

Les deux véhicules sont encore extraits et sont pistés sur sept vues pour celui qui s'éloigne, et sur l'ensemble des neuf vues pour celui qui se rapproche. Par contre, ils ne se distinguent pas des échos fixes pour ce qui est du déplacement apparent, de l'ordre d'un pixel. L'illumination est un moins bon facteur de sélection. La figure 18 montre le résultat du filtrage et de l'estimation de la vitesse transversale pour les deux cibles coopératives.

La vitesse transversale de la cible qui s'éloigne, extraite cette fois-ci en dixième position, est estimée à +7 m/s comme dans le cas précédent, mais cette fois-ci les corrélations et leurs variations sont plus faibles (entre 0 et 13 m/s, les corrélations sont supérieures à 40% et le maximum vaut seulement 63%). La cible qui se rapproche, extraite en 49^{ème} position seulement, est estimée à une vitesse transversale de -26 m/s avec une corrélation de 98% contre 94% pour la bonne valeur de la vitesse transversale.

Cette configuration est peu adaptée aux vitesses purement transversales, car il n'y a pas moyen de faire la différence entre les échos fixes et les cibles mobiles sur ces vues rapprochées : sur la figure 18, les autres traits gras allongés pourraient tout aussi bien être des cibles mobiles au vu de leurs variations de rétrodiffusion. Ces variations sont en fait induites par les variations de l'angle de présentation entre les vues. Les deux véhicules ont été reconnus sur cette figure grâce à leurs positions reportées de l'essai à résolution réduite en azimut.

4. limitations de la méthode et perspectives

4.1. influence des paramètres de détection

Comme précisé plus haut, la technique de pistage est relativement rustique, et ses seuls paramètres sont, outre la borne supérieure sur la vitesse propre, les dimensions des pavés du seuillage local, la précision de localisation des plots et la valeur du seuil. Le pavé utilisé en résolution réduite $1,3 \times 7$ m est de 3×5 pixels, car l'effet de la défocalisation des cibles y est de l'ordre d'un pixel en azimut. En résolution $1,3 \times 1,3$ m, le pavé utilisé est de

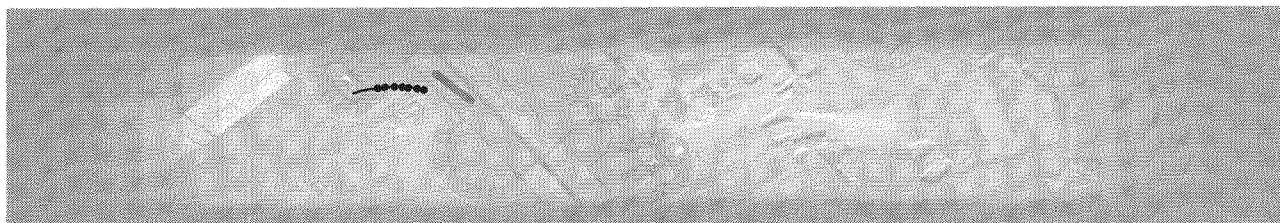


Figure 15. – Résultat du filtrage et de l'estimation de la vitesse transversale pour des vues de faible résolution couvrant toute l'ambiguïté Doppler. Points=plots mesurés, trait noir=positions apparentes théoriques (lissées), traits fins=trajectoires possibles, trait gris épais=trajectoire estimée.

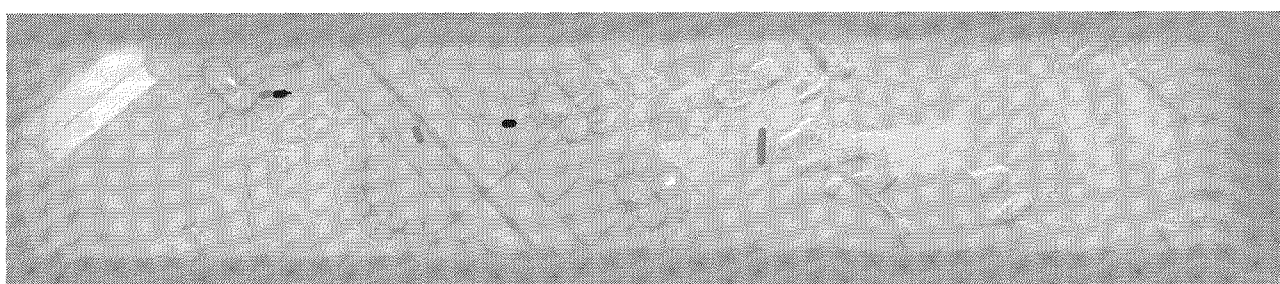


Figure 16. – Résultat du filtrage et de l'estimation de la vitesse transversale sur les vues rapprochées. Points=plots mesurés, traits fins=trajectoires réelles possibles, traits gris épais=trajectoires estimées.

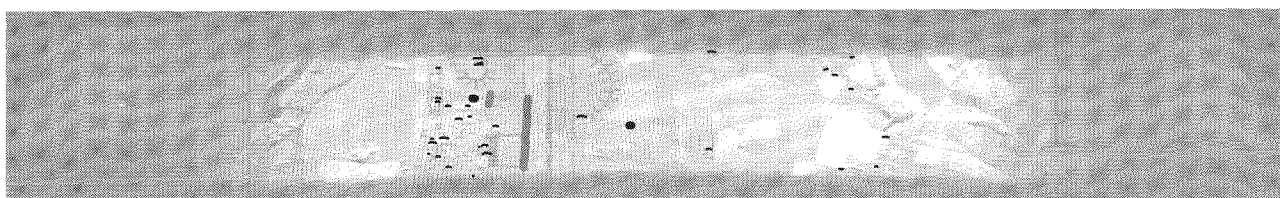


Figure 17. – Résultat du filtrage et de l'estimation de la vitesse transversale sur les vues à résolution réduite. Points=plots mesurés des véhicules, Petites courbes noires=trajectoires apparentes lissées des autres pistes, traits fins=trajectoires possibles, traits gris épais=trajectoires estimées.

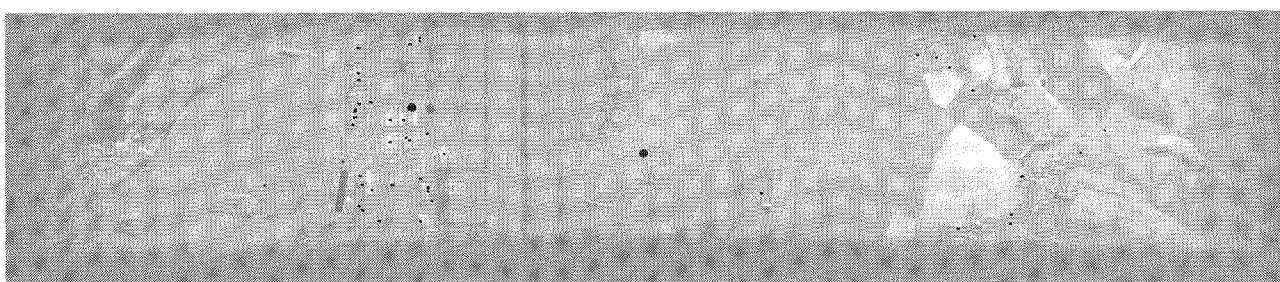


Figure 18. – Résultat du filtrage et de l'estimation de la vitesse transversale sur les vues rapprochées. Gros points=plots mesurés des véhicules, petits points=échos fixes, Traits fins=trajectoires réelles possibles, traits gris épais=trajectoires estimées.

3×9 pixels car l'effet de la défocalisation due au mouvement y est de l'ordre de 5 à 6 pixels en azimut. La précision de localisation des plots, utilisée avec la vitesse maximale pour calculer les bornes de la figure 4 est de 1 pixel pour l'essai en résolution réduite et de 3 pixels en distance et 5 pixels en azimut pour l'essai sur des vues rapprochées. Ces valeurs sont pratiquement des limites inférieures, car le seuillage adaptatif est effectué sur des images *mono-vue*, donc la surface des pavés conditionne la sensibilité au speckle. Une surface de 15 et 27 pixels respectivement donne un rapport écart-type sur moyenne d'environ 0,26 et 0,19 respectivement. D'autre part, la position

des maxima locaux est aussi altérée par le speckle et on ne peut pas supposer que la précision de localisation d'un plot excède la largeur de la tache de diffraction de la cible défocalisée. Le filtrage est par contre peu sensible à une augmentation de ces valeurs.

Le dernier essai à résolution réduite, pour le survol perpendiculairement à la piste, a été aussi réalisé avec différentes valeurs du seuil d'extraction des plots. Le seuil de 3 dB produit environ 400 plots par vue, 19 500 initiations de pistes et 43 pistes après filtrage. Un seuil baissé à 2,3 dB porte à 700 le nombre de plots par vue, et à 79 000 le nombre de pistes initiées pour 65 pistes après

filtrage. Enfin, un seuil de 1,5 dB conduit à 1500 plots par vue, 475 000 initialisations de pistes et 156 pistes après filtrage. Pour comparaison, l'essai en résolution homogène avec un seuil à 3 dB conduit à 140 plots par vue, 270 initiations de pistes et 77 pistes après filtrage. On a donc beaucoup plus de marge pour baisser le seuil d'extraction des plots pour des vues rapprochées, car le paramètre d'espacement des vues est critique pour les dimensions des voisinages de la figure 4 donc pour le nombre d'initiations de pistes.

4.2. domaine des vitesses accessibles à la méthode

Afin de mieux visualiser les limitations de la méthode et de comparer avec les méthodes par filtrage Doppler, on peut calculer les variations de certaines caractéristiques des cibles mobiles en fonction de leur vitesse propre. Il est possible de calculer le déplacement apparent, en pixels, de la cible pendant qu'elle se trouve simultanément dans le lobe d'antenne et dans l'intervalle Doppler utilisé pour le calcul des vues. Dans les diagrammes qui suivent nous avons utilisé la largeur à 6 dB du lobe d'antenne, car cela correspond à peu près à l'intervalle de visibilité de la cible. On peut aussi calculer le Doppler de la vue dans laquelle la cible est le mieux illuminée, la bande Doppler au dessus de 6 dB, qui permet d'estimer rapidement en fonction de l'espacement des vues, le nombre de vues sur lesquelles la cible sera visible. La figure 19 définit l'orientation des diagrammes par rapport au mouvement de l'antenne, et la position des véhicules observés dans les diagrammes.

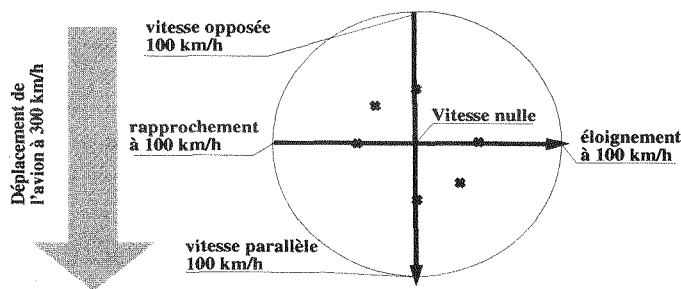


Figure 19. – Orientation des diagrammes de vitesse. Les six croix indiquent les positions des cibles coopératives de l'expérience.

4.2.1. cas des vues à résolution réduite

Comme les vues à résolution réduite couvrent un intervalle de fréquences Doppler important (± 2 kHz), les cibles de vitesse inférieure à 100 km/h y restent durant toute leur illumination au dessus de 6 dB. Malgré la résolution réduite en azimut, le déplacement apparent en nombre de pixels, figure 20, est presque toujours suffisant pour être décelable. On pourra envisager dans une telle configuration, de seuiller le déplacement apparent. Ceci

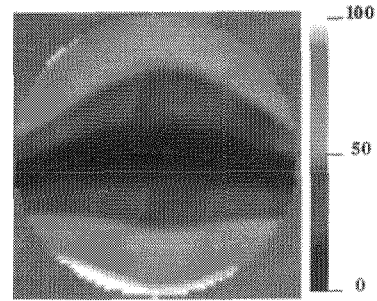


Figure 20. – Déplacement apparent, mesuré en pixels (de $1,3 \times 7$ m) pendant l'illumination de la cible, en fonction de sa vitesse propre.

permet d'éliminer les échos fixes, qui représentent la totalité des fausses alarmes dans les essais effectués, au prix de la non-détection d'une très faible proportion de cibles effectivement mobiles.

La figure 21 donne la proportion des cibles mobiles éliminées de vitesse inférieure à 100 km/h et supérieure à 5 km/h (■) ou 3 km/h (○) en fonction du déplacement apparent minimum durant leur illumination au dessus de 6 dB. On peut estimer qu'un déplacement de deux pixels peut être discriminé sur cinq vues⁷ d'un déplacement nul, entraînant l'élimination de 2,5% des cibles, celles dont le vecteur vitesse est pratiquement orthogonal à la trajectoire de l'antenne. Pour comparaison avec le MTI par filtrage Doppler, si l'on approxime la précision de mesure sur le décalage Doppler, par la largeur à 3 dB du lobe d'antenne, la proportion des cibles non-détectées est de 21%. Ces cibles sont approximativement celles dont la composante transversale est entre -20 km/h et +10 km/h, c'est-à-dire environ la moitié de celles comprises entre les deux lignes noires de la figure 24. L'intervalle est asymétrique,

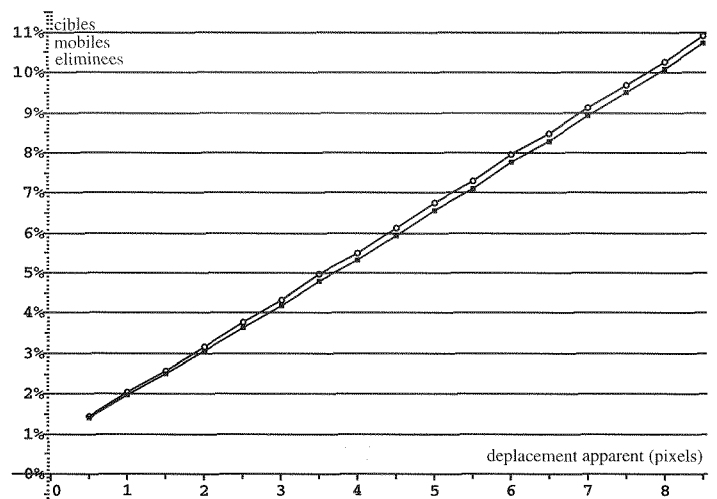


Figure 21. – Taux des cibles mobiles éliminées en fonction du déplacement apparent minimum. ■ pour $5 \leq V \leq 100$ km/h, ○ pour $3 \leq V \leq 100$ km/h.

7. La précision de mesure du déplacement croît avec le nombre de mesures. Or les cibles dont le déplacement est faible, en noir et bleu sur la figure 20, sont, d'après la figure 22, illuminées au dessus de 6 dB sur au moins 5 vues.

car les simulations sont faites avec la dérive du passage en travers de la piste ($1,13^\circ$).

La largeur de la bande Doppler sur laquelle la cible est illuminée au dessus de 6 dB figure 22 montre que les cibles sont visibles sur au moins 66% de la largeur de bande du sol. Sur la figure 6, l'illumination du sol s'étend sur 6 à 7 vues. On en déduit qu'une piste contient au moins 4 à 5 plots.

Le paradoxe apparent de la figure 22 est que les cibles en mouvement dans le même sens que l'antenne ont une largeur Doppler plus faible. Elles sont donc visibles dans un moins grand nombre de vues, alors que justement ces cibles là sont illuminées plus longtemps. Le cas limite étant celui d'un véhicule se déplaçant parallèlement à la trajectoire de l'antenne avec la même vitesse. Il n'apparaîtrait que sur la vue de Doppler nul, sous la forme d'une ligne brillante.

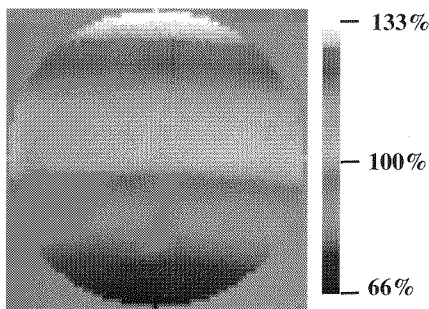


Figure 22. – Largeur de la bande Doppler dans laquelle la cible est illuminée au dessus de 6 dB. La largeur de bande est comparée à celle du sol.

4.2.2. cas des vues rapprochées

A la différence du cas précédent, les neuf vues rapprochées ne couvrent pas toute la bande Doppler contenant les cibles mobiles de vitesse inférieure à 100 km/h. Sur les diagrammes, on masquera en gris clair la région où l'illumination de la cible mobile est toujours en dessous de 6 dB pour toute la bande Doppler explorée. En comparant les figure 20 et figure 25, on gardera à l'esprit que, si l'échelle n'est pas la même (0 à 100 contre 0 à 500 pixels), la défocalisation accrue limite la précision de localisation dans le même rapport. Le gain apporté par la résolution en azimuth n'améliore la précision de localisation que pour les cibles lentes ($V \approx 20$ km/h).

La figure 28 montre que les neuf vues rapprochées sont idéales pour l'imagerie du sol, car toute sa bande Doppler au dessus de 6 dB s'y trouve. Par contre, hormis les cibles dont la vitesse tombe dans le secteur blanc⁸ de la figure 27, on ne peut corréliser avec la courbe d'illumination théorique qu'une partie du lobe de la courbe d'illumination mesurable.

La comparaison entre les deux traitements à résolution réduite et homogène, ébauche la mise en évidence d'un compromis sur la résolution en azimuth des vues utilisées pour le traitement. Le tableau 2 donne les éléments principaux de ce compromis.

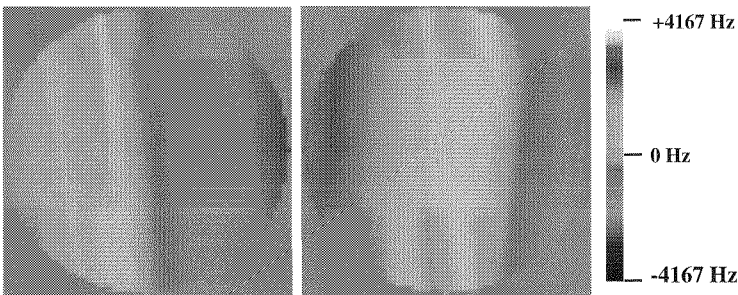


Figure 23. – Début et fin de la bande Doppler au dessus de 6 dB, des cibles mobiles.

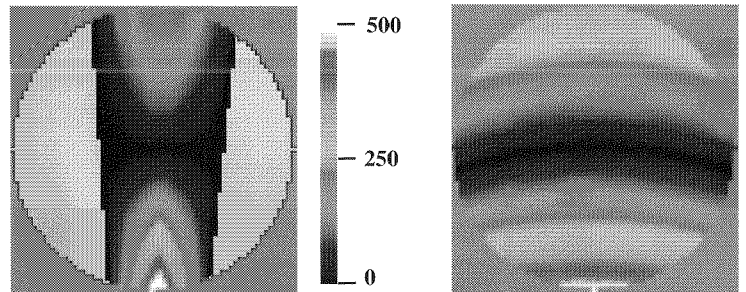


Figure 25. – A gauche : déplacement apparent en pixels (de 1.3 m), des cibles mobiles pour une bande Doppler de 900 Hz. A droite, pour comparaison, les déplacements apparents pour toute la bande d'ambiguïté Doppler. Les zones gris clair ne sont pas illuminées au dessus de 6 dB dans la bande utilisée.

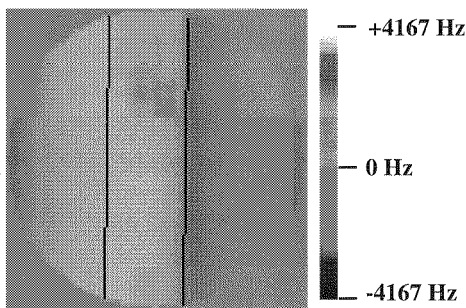


Figure 24. – Doppler au maximum d'illumination des cibles mobiles. Les traits noirs délimitent la bande Doppler à 6 dB du sol.

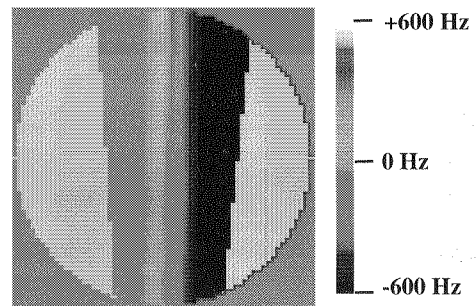


Figure 26. – Doppler du maximum d'illumination des cibles mobiles sur la bande de 900 Hz.

8. Le secteur blanc contient justement un des deux véhicules de la figure 13, dont la composante transversale de la vitesse est bien estimée.

Tableau 2. – Incidence du choix des vues sur la détection des cibles mobiles.

Action	Effets positifs	Effets négatifs	Effets neutres
Augmentation de la résolution des vues (corrélativement, plus longue intégration)	Meilleure détection des cibles quasi-ponctuelles faibles mais lentes car leur contribution est moyennée avec celle du fond sur une surface de pixel plus petite.	Calcul et traitement plus long des vues (proportionnel au nombre de pixels), ou vues plus espacées.	Neutre pour les cibles plus rapides (en longitudinal), car leurs flous de bougé augmentent. Impose aussi un traitement de détection des plots qui accepte des taches brillantes plus étalées.
Augmentation de l'espacement des vues	Meilleure détection des cibles de mouvement apparent lent	Augmentation de la complexité de l'initiation des pistes, et éventuellement la perte de sensibilité aux cibles visibles seulement sur une bande de fréquence Doppler étroite.	
Augmentation du nombre de vues	Couverture d'une bande Doppler plus large, donc meilleure détermination de la vitesse transversale par corrélation entre illumination théorique et rétrodiffusion observée, et une meilleure détection des cibles à forte composante transversale de la vitesse, dont l'illumination est plus importante pour des fréquences Doppler éloignées de celles du fond.	Augmentation du volume de calcul et de traitement proportionnelle au nombre de vues.	

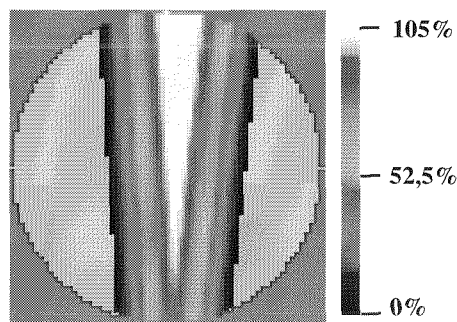


Figure 27. – Largeur de la partie de la bande de 900 Hz dans laquelle la cible est illuminée au dessus de 6 dB. Cette largeur est comparée à celle du sol.

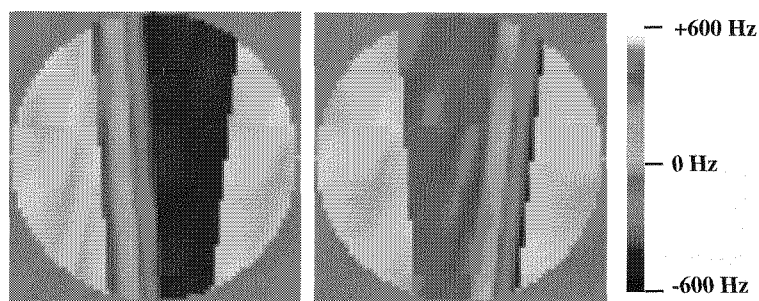


Figure 28. – Début et fin de la bande Doppler au dessus de 6 dB des cibles mobiles, à l'intérieur de la bande de 900 Hz.

4.3. relation avec les méthodes MTI et autofocus classiques

Les méthodes classiques de MTI reposent généralement sur la détermination d'un décalage Doppler entre la cible mobile et le fond. Ces méthodes s'apparentent à la technique utilisée ici pour déterminer la composante transversale de la vitesse propre avec une antenne à une seule voie [2]. D'autres méthodes s'appuient sur une analyse temps-fréquence pour repérer les réflecteurs dont la pente Doppler est anormale, révélant une composante longitudinale de la vitesse propre [13], [14], [15]. Ces méthodes se rapprochent beaucoup de celle exposée ici, puisque la composante linéaire du déplacement apparent en azimuth est liée à la pente Doppler.

Le premier groupe de méthodes souffre de limitations dues à la largeur du lobe d'antenne, qui peut avoir été optimisé à des fins d'imagerie. La contrainte que le décalage Doppler de la cible la place hors du fond suppose que le spectre Doppler du fond soit assez étroit (donc un lobe d'antenne réelle étroit). Sa détectabilité suppose un rapport signal/fond important dans la porte distance considérée, donc que le rapport entre la surface éclairée et celle de la cible ne soit pas défavorable, ce qui implique encore un lobe d'antenne étroit. Un lobe étroit peut être incompatible avec d'autres utilisations du signal, en particulier il interdit la réalisation d'images multi-vues.

Le second groupe de méthodes se compare mieux avec la méthode de détection multi-vues décrite ici, mais demande un volume de calcul plus important, puisqu'une transformée temps-fréquence sur une porte distance, correspond, au premier ordre, au calcul d'un très grand nombre de vues se chevauchant. La détection

d'une ligne de pente anormale est analogue à la recherche d'un point se déplaçant d'une vue à l'autre une fois les vues recalées (c'est-à-dire une fois la pente Doppler du sol compensée). Par contre cette recherche se fait sur une seule porte distance, ce qui pose des problèmes si la migration distance n'est pas compensée, ou dans le cas où la migration distance est différente de celle du sol. Le déplacement apparent en distance de la cible mobile sur la figure 15 montre que cette hypothèse peut être loin d'être satisfaite dans une configuration réelle.

La méthode de détection de mouvement a aussi un lien avec les méthodes d'autofocus reposant sur l'utilisation de points brillants [8]. Le but de ces méthodes est d'obtenir une correction de la phase à appliquer au signal pour compenser une erreur de vitesse, la mesure de la correction étant obtenue sur un ou plusieurs points brillants de l'image. Ces méthodes permettent en fait de mesurer localement l'écart à 1 du paramètre A correspondant au sol dans (8). Il faut noter que cette formule interdit de retrouver la vitesse du sol par autofocus dans le cas d'un vol parfaitement rectiligne uniforme. Dans la pratique, le vol d'un aéronef est suffisamment non-linéaire et non-uniforme pour que dans le cas où l'on dispose de mesures des hautes fréquences de la trajectoire (par exemple avec une centrale inertielle) on puisse retrouver les erreurs de basse fréquence, et en particulier le biais de dérive, en corrélant les vues obtenues avec des vitesses dont la différence de module et d'orientation est connue. En effet, les ambiguïtés de position et de vitesse transversale ne sont plus les mêmes et le biais sur la vitesse transversale peut être résolu. On pourrait, en théorie, envisager d'utiliser ce phénomène pour localiser une cible mobile selon les quatre degrés de liberté, mais en pratique la méthode n'a été démontrée [6] qu'en moyennant les corrélations effectuées sur toute la surface commune entre deux vues éloignées d'un enregistrement complet durant plusieurs dizaines de secondes.

La détermination de l'angle de déport à l'aide d'une antenne multi-voies est une généralisation d'une technique très utilisée par les radars de poursuite, appelée « mono-pulse de phase » [16]. Cette méthode consiste à asservir la position d'une antenne à deux voies (sur chaque axe en fait) à l'annulation de la différence de phase entre les deux voies (voie dite « delta » pour « différence »). Cette technique suppose toutefois une réjection du clutter importante obtenue par filtrage Doppler pour les cibles approchantes et/ou par annulation d'écho (« side lobe blanking »). Pour le cas d'un véhicule terrestre observé par un SAR, la cible est généralement noyée dans le clutter. Le processus de synthèse de vues complexes pour chacune des voies permet néanmoins de séparer la contribution de la cible de celle du fond à la fois dans le domaine fréquentiel (par exemple, en sélectionnant une vue hors du lobe d'antenne pour le sol), mais aussi en gisement, en effectuant un filtrage sur la pente Doppler (c'est le processus de synthèse lui-même). Une autre approche [17], [18], [19] cherche à annuler le fond avant détection par une « voie différence » ajustée de manière adaptative pendant l'acquisition. On peut imaginer augmenter la sensibilité de la détermination du déphasage en recalculant des vues focalisées sur la cible mobile, sur lesquelles la tache de diffraction de la cible sera plus réduite, et donc la mesure du déphasage entre les deux voies sera plus précise. La figure 29 illustre cette technique par le détail d'images au voisinage d'un des véhicules de la figure 13. La première image est le détail de la cinquième des vues rapprochées, la seconde est le détail de l'image 9-vues obtenue à

partir de toutes les vues rapprochées. Les deux dernières images sont la cinquième vue et l'image 9-vues obtenues avec une mise au point sur la cible mobile. Le mouvement utilisé est calculé avec les trois paramètres issus de la méthode de détection, mais avec une composante transversale intentionnellement faussée pour que la vitesse soit double en module et tournée de 50° en orientation. La cible y est toutefois bien focalisée, ce qui confirme le fait que les observations de la phase seule ne permettent pas de discriminer⁹ les valeurs de la composante transversale de la vitesse. Par contre, le niveau relatif du fond est fortement diminué par la seconde focalisation (toutes les images sont normalisées par rapport au point le plus brillant), et cela ne peut qu'améliorer la mesure du déport de la cible.

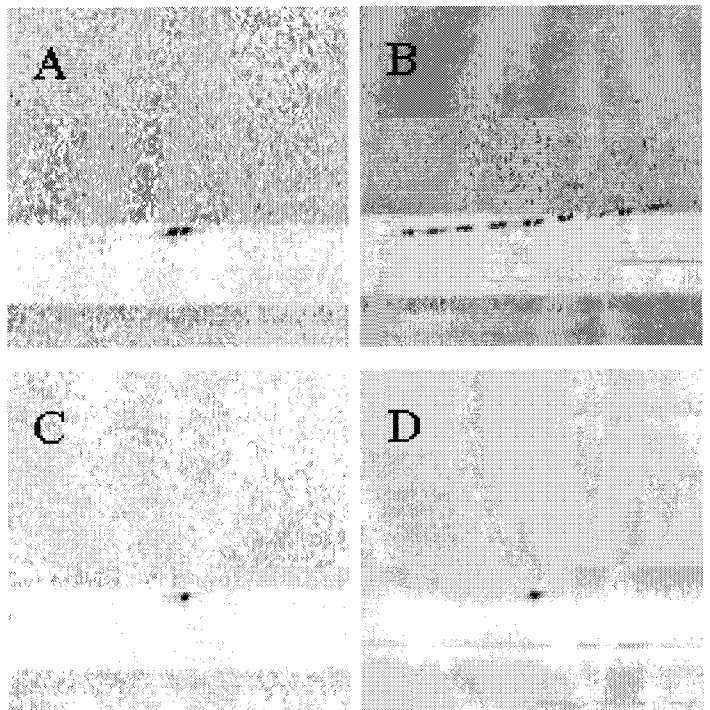


Figure 29. – Mise au point sur une cible mobile. A : mono-vue focalisée sur le sol, B : image 9-vues focalisée sur le sol, C : vue du milieu focalisée sur la cible, D : image 9-vues focalisée sur la cible.

5. conclusion

l'expérimentation décrite ici, valide la technique de détection des cibles mobiles par imagerie multi-vues, même si avec une antenne mono-voie la détermination de la composante transversale de la vitesse propre est peu précise. En effet, nous avons montré que la détermination de cette composante du mouvement est liée à la résolution en déport de l'antenne réelle, c'est-à-dire à la

9. Cela n'est vrai en toute rigueur que si la trajectoire de l'antenne est parfaitement linéaire, ce qui est le cas pendant l'illumination de la cible présentée.

largeur de son lobe principal. Dans notre configuration matérielle, les 6° d'ouverture angulaire de l'antenne cornet se traduisent par une précision d'au mieux 15° sur la direction de la vitesse propre de la cible et de quelques dizaines de mètres d'écart en position. La détermination des positions, de la vitesse propre et de son orientation pour les cibles mobiles nécessite en pratique de disposer d'une antenne à deux voies séparées horizontalement. Notons toutefois, que la seule détection des cibles mobiles, sans la détermination précise de leurs positions, est bien possible avec cette approche, en particulier même si la cible se déplace parallèlement à la ligne de vol du radar.

Remerciements

Nous tenons à remercier la division radar de M. Appel à l'ONERA pour avoir fourni les enregistrements de signaux et de nombreux conseils et informations sur leur radar, et en particulier M. Daniel Sicard.

6. annexe

Principes et terminologie de l'imagerie SAR

La fonction de base d'un radar (dont il tire son nom : *radio aircraft detection and ranging*)

est de détecter et mesurer la distance d'un objet réfléchissant les ondes radio. Son principe consiste à envoyer une impulsion électromagnétique selon un pinceau étroit et mesurer le temps écoulé avant la réception de l'écho sur la cible de l'impulsion émise. Une « image » de *rétrodiffusion* (énergie radio-électrique renvoyée vers l'antenne) peut être obtenue en dirigeant l'antenne de façon à balayer une région étendue (c'est l'image populaire de l'antenne parabolique qui balaye l'horizon en tournant selon un axe vertical).

Ce schéma n'est que conceptuel pour le type de radar utilisé ici, car une mesure précise du temps de vol aller-retour de l'impulsion suppose une impulsion très brève (par exemple, 9 ns pour la résolution de 1,3 m de la figure 5) et d'autre part, généralement on attend de recevoir l'écho avant de ré-émettre une impulsion (par exemple, sur la figure 5, il faut attendre 33 μs pour observer à 5 km de distance). Le rapport entre la puissance moyenne et la puissance crête pendant l'émission devient alors extrêmement sévère.

La technique de *compression d'impulsion* diminue la puissance instantanée requise en séparant avec des délais variables les différentes fréquences composant l'impulsion avant l'amplification et l'émission et en opérant l'opération inverse après réception des échos. Par exemple, pour l'image figure 5 le radar RAMSES émettait des *chirps* (impulsions étalées en rampes linéaires de fréquence) longs de 13 μs et dont la puissance instantanée n'était que de 20 W, mais qui équivalaient à des impulsions de 9 ns d'une puissance de 30 kW !

La re-compression des échos suppose une démodulation par un *chirp* similaire (la « réplique ») et une transformation de Fourier. Dans le radar RAMSES, la démodulation est faite analogiquement

avant la numérisation du signal, qui sera donc dit « *dérampé* » ; ceci présente l'avantage de diminuer la largeur de bande de fréquence du signal à numériser.

La seconde difficulté est la limite apportée par la diffraction à l'étrécissement du pinceau d'ondes émises. Cette diffraction est inversement proportionnelle à la taille de l'antenne, ce qui explique le gigantisme des antennes des radars à très longues portées ou des radio-télescopes, et la faible résolution angulaire d'une antenne aéroportée, nécessairement de taille réduite. Par exemple, la résolution brute de l'antenne RAMSES utilisée pour la figure 5 correspond à 600 m au sol.

La technique dite de *l'ouverture synthétique* résout ce problème en exploitant le déplacement de l'avion porteur pour calculer l'écho qu'obtiendrait une antenne « virtuelle » très directive, par la combinaison des échos mesurés sur plusieurs impulsions successives. Le principe est qu'un point donné du sol reste éclairé par l'antenne pendant 600 m du déplacement (figure 30), donc il est possible d'ajouter les signaux, enregistrés avec phase et amplitude, durant un *temps d'intégration* et ainsi simuler une antenne longue et étroite. Le calcul précis d'une antenne *focalisée* (« mise au point ») sur un point cible donné, suppose d'altérer les phases relatives des échos des différentes impulsions de façon à simuler un trajet optique constant entre le point cible et toutes les positions successives de l'antenne réelle. Ainsi, l'antenne formée par le même tronçon de la trajectoire peut être « dirigée » en *déport* en ajustant les déphasages appliqués. Comme la trajectoire est proche d'un mouvement rectiligne uniforme (la *trajectoire nominale*), le déphasage est, au premier ordre, proportionnel au temps, le facteur de proportion est appelé *Décalage Doppler* correspondant au déport donné. En général, on ne se limite pas à la compensation du seul premier ordre, car la résolution obtenue par ce traitement dit *non focalisé*, est faible.

Il est possible de calculer une longue *vue panoramique* en empilant les échos (re-) *comprimés en distance* obtenus par une antenne synthétique glissante opérant à un angle de déport constant. Chaque ligne de la vue panoramique correspond au sol à l'intersection entre le plan du sol et le cône d'angle de déport donné, c'est donc un arc d'hyperbole. En général, comme sur la figure 31, l'antenne synthétique est plus courte que la durée d'illumination,

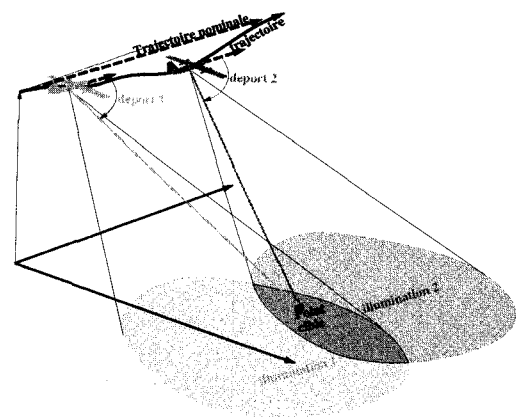


Figure 30. – Géométrie de l'imagerie SAR aéroportée.

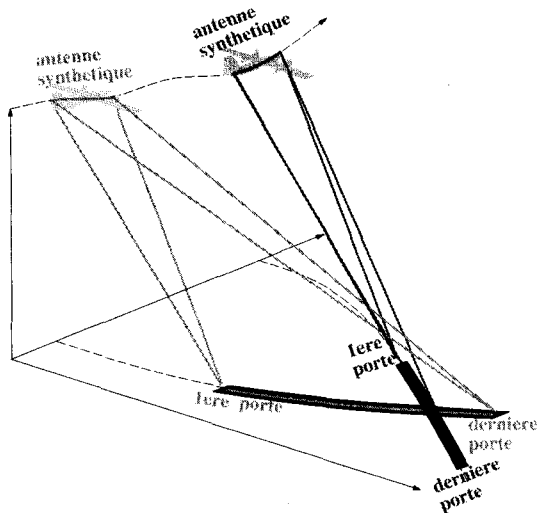


Figure 31. – Exemple de deux antennes synthétiques opérant à des angles de départ différents.

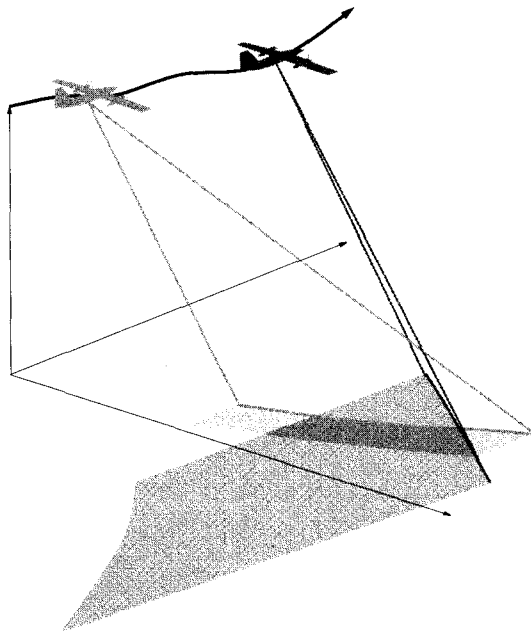


Figure 32. – Comment deux antennes synthétiques glissantes et opérant avec des déports différents produisent deux vues panoramiques.

ce qui permet de calculer comme sur la figure 32 plusieurs vues indépendantes (ou *looks*) avec différentes valeurs du déport. Par exemple, la figure 5 est la superposition de 12 vues, 4 par passage de l'avion, pour quatre antennes synthétiques longues de 46 m.

Il est important de noter que l'addition des signaux pour obtenir ceux de l'antenne synthétique est une addition de nombres complexes (phase et amplitude), un tel radar est nécessairement *cohérent*, c'est-à-dire qu'il peut mesurer précisément la différence de phase entre le signal émis et l'écho reçu. En conséquence, chaque pixel de la vue obtenue par une antenne synthétique est un nombre complexe, même si seul le module en est généralement visualisé.

A l'instar d'une surface rugueuse éclairée par un faisceau laser, les réflecteurs surfaciques ou volumiques d'un paysage scintillent en radar en raison de l'interférence sous des déphasages aléatoires de milliers de réflecteurs élémentaires. Les parties réelle et imaginaire du signal s'apparentent donc à deux variables Gaussiennes indépendantes. Cela explique l'aspect « granuleux » d'une image SAR mono-vue, car le module de la valeur complexe des pixels suit approximativement une loi statistique dont l'écart-type est égal à la moyenne. On peut montrer que les granulations ou *speckle* des vues obtenues avec des antennes synthétiques disjointes sont, sous cette approximation, indépendantes et que donc la moyenne des modules, ou « moyenne incohérente » de N vues, a la même valeur moyenne mais une variance divisée par N . Cela explique l'intérêt du calcul d'une image SAR *multi-vues* pour réduire le *speckle* et rendre ainsi perceptibles de faibles variations de rétrodiffusion sur le terrain, c'est-à-dire améliorer la *résolution radiométrique*.

Comme l'avion (à la différence d'un satellite) ne vole pas exactement selon une droite, ni à vitesse uniforme, les déphasages de l'antenne synthétique varient le long de la vue panoramique et le décalage Doppler correspondant à un déport constant par rapport à la trajectoire nominale fluctue dans le temps. Il est possible de calculer au lieu d'une image à déport constant, une image à fréquence Doppler constante, mais ses lignes ne sont pas réparties de façon uniformes sur le sol.

La *compensation de mouvement* est la façon de traiter les variations des déphasages dans le temps. Les techniques dites *autofocus* utilisent le signal radar lui-même pour déterminer ou améliorer la connaissance de l'écart entre la trajectoire nominale et la trajectoire réelle.

Une conséquence du fonctionnement par impulsion du radar est que le signal enregistré est échantillonné avec une certaine fréquence. Cette fréquence est appelée *fréquence d'ambiguïté Doppler* car il est impossible de déterminer si un signal enregistré à une fréquence f donnée n'est pas en fait l'échantillonnage d'un signal de fréquence f plus un multiple entier de la fréquence d'ambiguïté. Bien entendu, on choisit en général la fréquence d'ambiguïté de sorte que le déport équivalent (par la correspondance Doppler \leftrightarrow déport) soit bien supérieur à l'ouverture angulaire du lobe d'antenne, car sinon on aurait sur l'image, une « image écho » décalée de l'angle de l'ambiguïté Doppler, et dont l'intensité relative est appelée *taux d'ambiguïté en azimut*.

Dans notre expérience, cette fréquence d'ambiguïté limite les déports sur lesquels on peut essayer de rechercher une cible mobile, car les images obtenues au delà de la fréquence d'ambiguïté répètent (modulo une erreur de focalisation) les vues situées en deçà.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Sicard D. MTI with wide beam antenna, *Proceedings of PIERS'95*, Seattle, Juil.1995.
- [2] Barker D., Baker C.J. Single Beam SAR MTI, *Proceedings of SEE&IEEE SAR'93*, Avril 1993.
- [3] Ouchi K On the multilook images of moving targets by synthetic aperture radar, *IEEE trans. on antennas and propagation*, Vol.AP-33, No 8, Août 1985.
- [4] Carrara W. Shadow-Tracking Algorithm for Moving Target Detection, *SPIE Vol. 1101, Millimeter Wave and Synthetic Aperture Radar*, 1989.

La détection de cibles mobiles sur les images SAR

- [5] Cantalloube Hubert, Nahum Carole Synthèse d'images SAR à partir des signaux radar, *ONERA RT 1/3775 SN BP 72, 92322, Châtillon (France)*, juil 1995.
- [6] Cantalloube Hubert, Nahum Carole Autofocusing of (Inverse) Synthetic Aperture Radar for Motion Compensation, *NAECON Symposium*, Dayton U.S.A., Mai 1996.
- [7] Cantalloube Hubert, Nahum Carole Motion compensation and autofocus of range/Doppler or two-dimensional processing for airborne synthetic aperture radar, *Aerospace science and technology*, Vol. 02, Juil 98.
- [8] Niho Yoji G., Hudson Ralph E., Flanders Tammy L. Multiple discrete autofocus, *US. patent 5,248,976* (sept 1993).
- [9] Bar-Shalom Yaakov Tracking and Data Association, *Academic Press, (Vol. 1), Artech House (vol. 2) Boston* 1992.
- [10] Dezert Jean Vers un nouveau concept de navigation autonome d'engins. Un lien entre le filtrage à associations probabiliste de données et la théorie de l'évidence, *Thèse doctorale Univ. Paris XI, ONERA Chatillon* 1990.
- [11] Cantalloube Hubert, Nahum Carole An original numerical method for autonomous navigation, *SPIE 94 symp. on guidance and navigation* avril 1994.
- [12] Del Moral P., Noyer J.C., Rigal G., Salut G. Résolution particulière et traitement non linéaire du signal : Applications radar/sonar, *Traitement du Signal Vol. 12-4* 1995.
- [13] Barbarossa S. Detection and imaging of moving objects with synthetic aperture radars - Part 1 : optimal detection and parametre estimation theory, *IEE proc.-F, Vol. 139-1*, févr 1992.
- [14] Barbarossa S. Doppler-rate filtering for detecting moving targets with synthetic aperture radars, *SPIE, Vol. 1101, millimeter wave and SAR* 1989.
- [15] Moreira J. A new MTI-SAR approach using the reflectivity displacement method, *IEEE trans. on geoscience and remote sensing, Vol. 33-5* sept 1995.
- [16] Le Chevalier François, *Principes de Traitement des Signaux Radar et Sonar* Masson, Paris (avril 1989).
- [17] Klemm R. Adaptive clutter suppression for airborne phased array radars, *IEE proc. Vol 130-1* 1983.
- [18] Richadson P.G. Analysis of the adaptive space time processing technique for airborne radar, *IEE proc. radar, sonar navig. Vol. 141-4* 1994.
- [19] Wang H. On adaptive spatial-temporal processing for airborne surveillance radar systems, *IEEE trans. on aerop. and elect. systems Vol. 30* 1994.

Manuscrit reçu le 29 janvier 1997.

LES AUTEURS

Hubert CANTALLOUBE



Hubert Cantalloube est né en 1962, ancien élève de l'école Normale Supérieure, il est titulaire d'une thèse de Ph.D. en automatique de l'Université Mc Gill. Il est chercheur à l'ONERA depuis 1989, où son activité de recherche concerne les aspects du traitement de l'image, du traitement du signal et de l'automatique, appliqués aux systèmes aéronautiques et spatiaux.

Carole NAHUM



Carole Nahum est née en 1960 à Carthage (Tunisie), ingénieur de l'ISMRa (Caen), elle est titulaire d'une thèse de Ph.D. en mathématiques de l'Université Mc Gill portant sur l'optimisation paramétrique et multicritères. Elle est chercheur à l'ONERA depuis 1989 et son activité de recherche concerne la dynamique du vol et les systèmes de défense antiaériens.