

# Chapitre 6

## Résultats pour cible de taille voiture

Ce chapitre se concentre sur l'évaluation de la performance des filtres de Kalman assistés par transformée de Hough ( $EKF_H$ ,  $KF_H$  et  $UKF_H$ ) pour des cibles de la taille d'une voiture. Des trajectoires rectilignes et courbes sont analysées.

### 6.1 Simulations pour trajectoires rectilignes

Cette section étudie la performance des filtres proposés  $EKF_H$ ,  $KF_H$  et  $UKF_H$  pour une cible de grande taille et des trajectoires rectilignes. Tel que discuté dans la section 3.4.2, l'erreur sur l'estimation de la trajectoire par la transformée de Hough est plus importante dans les circonstances d'une cible plus grande. Cela est dû en partie au fait que le centre de masse de la cible est décalé du centre de masse des mesures observées par le lidar, qui ne voit que les surfaces des cibles.

Afin de considérer ce décalage, la position exacte de la cible utilisée dans cette section pour évaluer l'erreur est celle du centre de masse des surfaces vues par le lidar. Pour une forme rectangulaire, cela se traduit comme la position moyenne des côtés (un ou deux) les plus rapprochés du lidar.

Les filtres proposés sont comparés entre eux et aux filtres de référence EKF et UKF en terme d'erreur quadratique moyenne sur l'estimation des états (exprimés en  $r$ ,  $\phi$ , direction et module du vecteur vitesse). Les simulations effectuées pour obtenir les résultats illustrés sont les mêmes que dans le chapitre précédent, sauf pour la taille de la cible rectangulaire qui est fixée à 2.5 m  $\times$  5 m. Les graphiques de l'erreur quadratique moyenne sont moyennés pour  $18^2$  trajectoires différentes dont le point d'entrée,  $r_1$  et de sortie,  $r_N$ , varient par bonds de 5 m entre 10 et 100 m. L'initialisation des filtres de Kalman et la matrice de covariance du procédé sont les mêmes que précédemment.

Encore une fois, la transformée de Hough n'est incorporée dans les filtres de Kalman qu'après la traversée de 2 éléments.

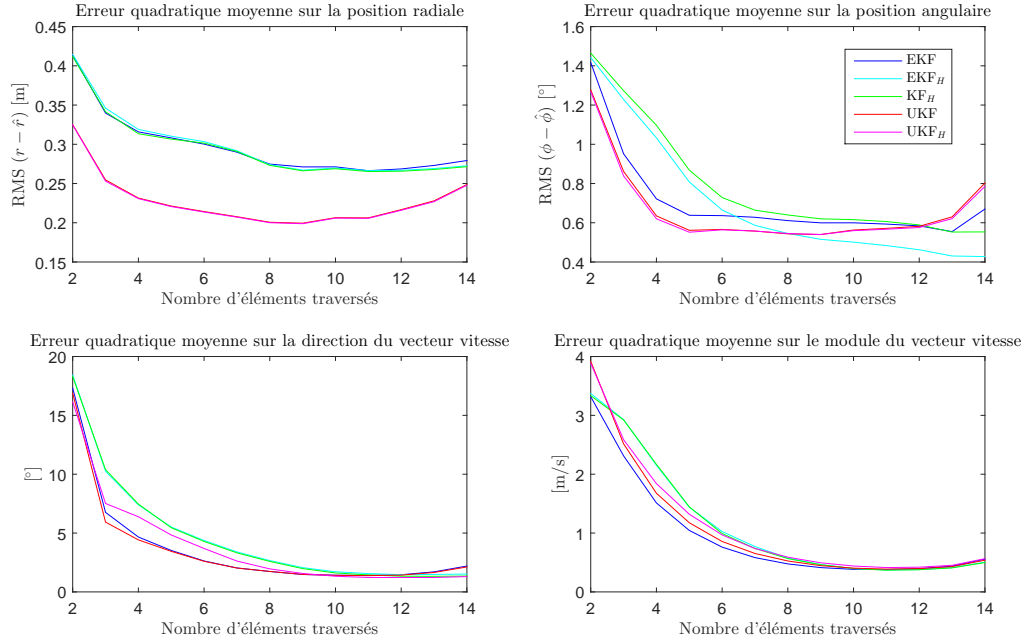


FIGURE 6.1 – Erreur quadratique des états estimés moyennée pour toutes les trajectoires rectilignes testées (cible  $2.5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ). Configuration lidar  $N = 16$  et  $\Delta\phi = 2.8^\circ$ .

Trois configurations lidars sont testées, soit celle utilisée pour l’acquisition de données expérimentales ( $\Delta\phi = 2.8^\circ$ ), celle qui sera déployée par le partenaire industriel ( $\Delta\phi = 10^\circ$ ) et une configuration intermédiaire ( $\Delta\phi = 5^\circ$ ).

Pour la configuration du lidar  $N = 16$  et  $\Delta\phi = 2.8^\circ$  à la figure 6.1, il n’y a pas de gain à l’utilisation de la transformée de Hough. La taille de la cible étant grande et les éléments ayant un petit champ de vue, le bruit uniforme est d’importance moindre par rapport au bruit gaussien sur la position angulaire de la moyenne des mesures. Ainsi, les filtres de Kalman de référence, optimaux pour un bruit gaussien, performant déjà bien.

En augmentant  $\Delta\phi$ , on augmente l’importance du bruit uniforme par rapport au bruit gaussien sur la mesure de position angulaire. Ainsi, à la figure 6.2, il est possible de remarquer un gain croissant de plusieurs degrés sur l’estimation de la direction du vecteur vitesse dans les derniers éléments du lidar entre le UKF<sub>H</sub> comparativement aux filtres de référence.

Pour la figure 6.3, soit celle concernant la configuration lidar qui sera déployée, le gain de l’utilisation du filtre UKF<sub>H</sub> par rapport au simple UKF se remarque davantage pour l’estimation de la direction ainsi que pour la position angulaire. Cependant, les autres filtres proposés, soit ceux utilisant la projection des mesures sur la droite estimée, sont moins intéressants. Cela est dû aux mesures qui varient de manière plus importante en  $r$  autour de la position exacte lorsqu’une cible de grande taille est observée par un lidar. Comme la projection est calculée

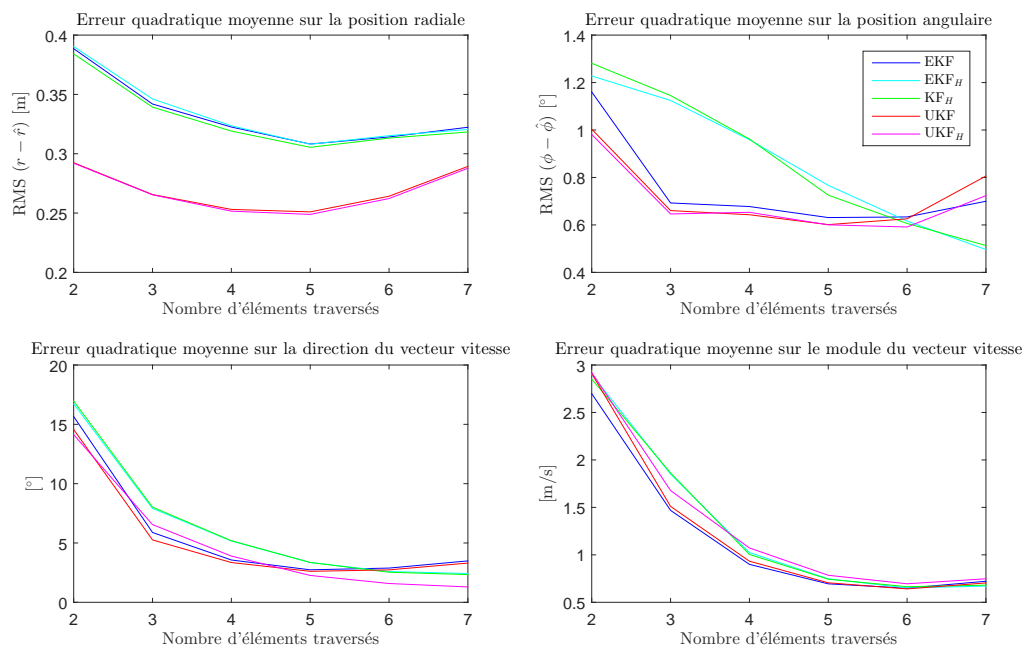


FIGURE 6.2 – Erreur quadratique des états estimés moyennée pour toutes les trajectoires rectilignes testées (cible  $2.5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ). Configuration lidar  $N = 8$  et  $\Delta\phi = 5^\circ$ .

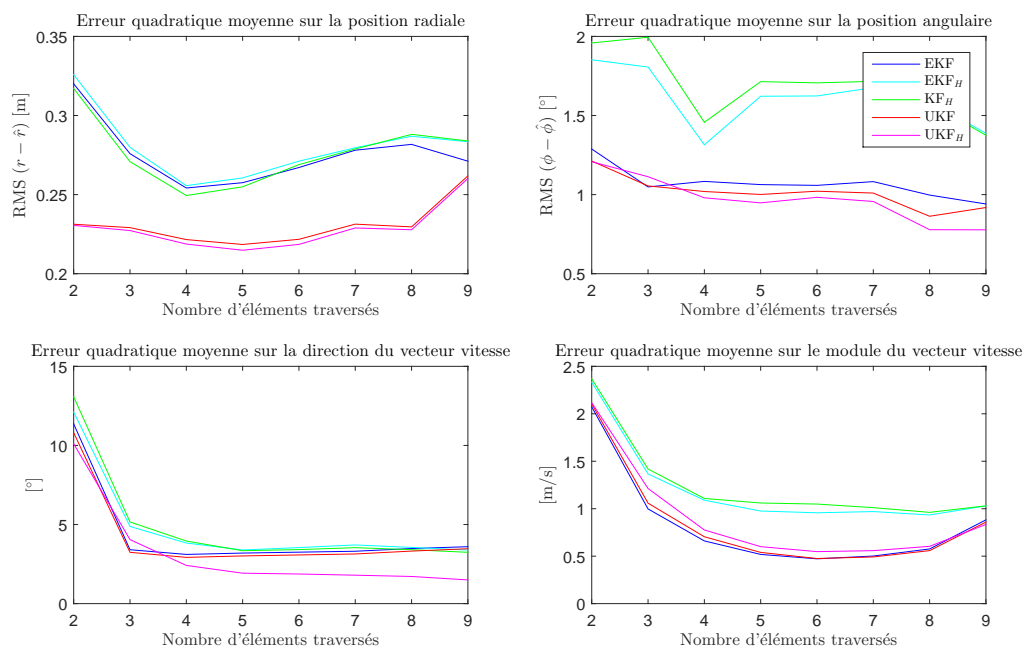


FIGURE 6.3 – Erreur quadratique des états estimés moyennée pour toutes les trajectoires rectilignes testées (cible  $2.5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ). Configuration lidar  $N = 9$  et  $\Delta\phi = 10^\circ$ .

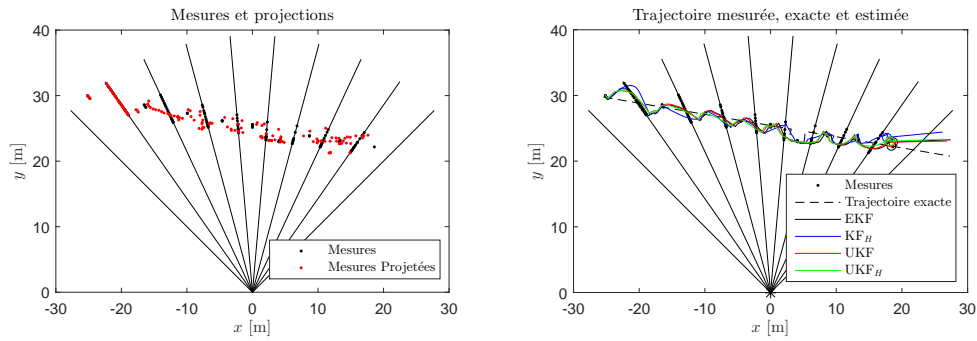


FIGURE 6.4 – Exemple de situation où les filtres de Kalman avec projection des mesures sont peu performants en raison de la propagation de l’erreur sur la mesure projetée.

à partir de la mesure radiale, l’erreur se propage dans la mesure projetée (voir l’exemple à la figure 6.4). L’erreur sur la projection de la mesure angulaire augmente donc avec la taille de la cible (voir figure C.6).

## 6.2 Simulations pour trajectoires courbes

La présente section s’intéresse à la performance du filtre de Kalman proposé  $UKF_H$  pour des trajectoires courbes. Il s’agit des mêmes situations simulées à la section 3.4.3 pour évaluer les performances de la transformée de Hough. La figure 3.21 décrit donc les paramètres des trajectoires étudiées et la figure 3.22 illustre la structure des matrices de résultats.

Les performances du filtre de Kalman  $UKF_H$  sont comparées dans la figure 6.5 à celle du filtre de Kalman  $UKF$  (de référence). Il s’agit en fait de la différence entre les erreurs quadratiques sur l’estimation des états. Lorsque la différence est positive (jaune vers rouge), le filtre  $UKF_H$  possède une erreur quadratique inférieure. Lorsque la différence est négative (jaune vers bleu), le filtre  $UKF_H$  possède une erreur quadratique supérieure. Pour les trois premiers changements d’éléments, les deux filtres sont égaux (différence autour de zéro, en jaune), car la transformée de Hough n’est prise en compte qu’après le 2<sup>e</sup> changement d’élément (comme dans le chapitre précédent).

Il est possible de remarquer une corrélation entre les zones où l’erreur sur l’estimation de la trajectoire est plus importante à la figure 3.23 et les zones où l’erreur du filtre  $UKF_H$  est supérieure (zones vert bleu). En effet, il est attendu que le filtre  $UKF_H$  soit moins performant lorsque l’estimation sur les paramètres de trajectoire  $\rho$  et  $\theta$  est moins précise, ce qui est le cas dans ces zones. Cependant, cela est surtout dû aux limites du système : pour cette résolution angulaire, deux trajectoires avec une courbure différente pourraient donner les mêmes mesures lidar. Ainsi, il est difficile d’estimer la bonne courbure en ne connaissant que les positions

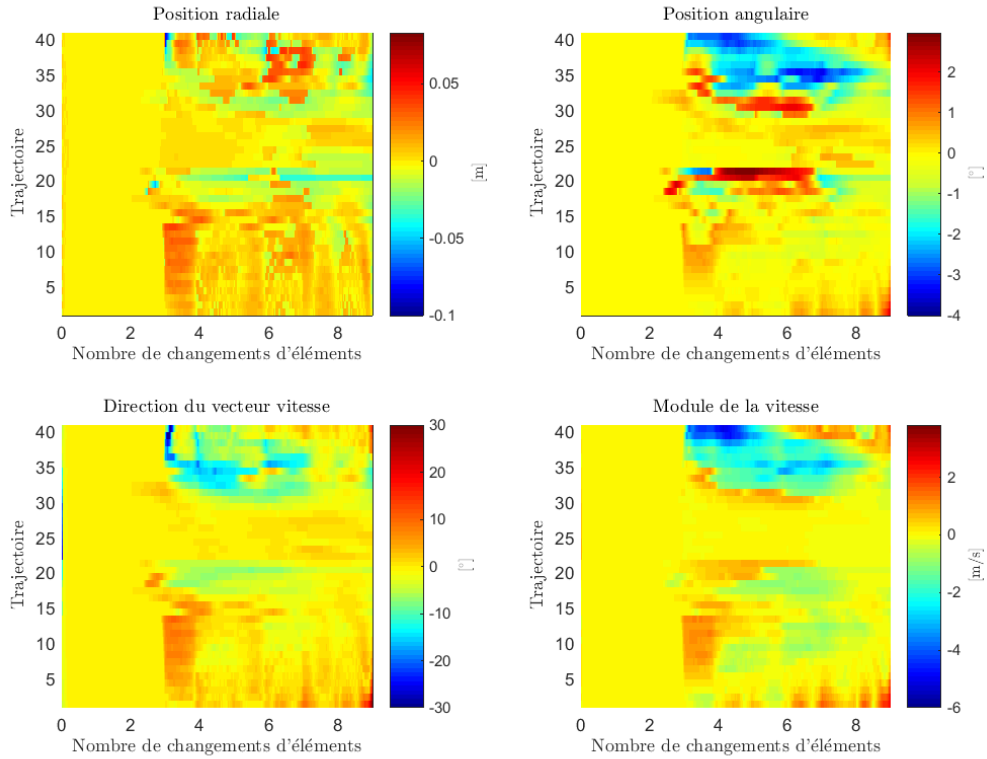


FIGURE 6.5 – Différence  $\text{UKF}_H - \text{UKF}$  de l’erreur quadratique moyenne pour une série de trajectoires courbes en fonction du nombre de changements d’éléments. Voir les figures 3.21 et 3.22 pour une description des trajectoires.

renvoyées par le lidar. La transformée de Hough est cependant conservatrice : elle vise à estimer la droite qui passe par le plus de mesures possible en priorisant les plus récentes (voir l’exemple à la figure 3.25).

Dans les zones où l’erreur sur les paramètres de trajectoire estimés est petite, le filtre  $\text{UKF}_H$  est cependant meilleur que celui de référence (coins hauts et bas à droite, figure 3.23). Pour les zones où le filtre  $\text{UKF}_H$  est également meilleur au centre de la matrice de résultats, il s’agit de situations pour lesquelles la cible s’approche du lidar avec une trajectoire dont le rayon de courbure est grand (variation lente des paramètres de trajectoire). Il s’agit également de situations pour lesquelles les mesures représentant la cible restent plus longtemps dans les mêmes éléments. Comme pour les trajectoires rectilignes, ces situations sont mieux gérées par le filtre  $\text{UKF}_H$  proposé, car sans l’estimation de la trajectoire, le filtre de référence converge vers le centre des mesures qui est immobile en position angulaire.

### 6.3 Conclusion

Dans ce chapitre, les filtres de Kalman proposés sont appliqués au pistage de cibles de grande taille et leurs performances dans ces conditions sont étudiées. Des trajectoires rectilignes, pour trois configurations lidars, ainsi que des trajectoires courbes avec accélération et décélération sont simulées.

Il est vu qu'étant donné la taille de la cible, le gain entre l'utilisation des filtres de Kalman ordinaires et ceux développés est moins important que pour une cible de petite taille. Ceci est expliqué par le ratio entre la taille de la cible et le champ de vue des éléments : la cible est moyennée dans un plus grand nombre d'éléments, ce qui diminue l'importance du bruit uniforme par rapport au bruit gaussien sur la mesure angulaire. Néanmoins, le filtre de Kalman UKF assisté par transformée de Hough est tout de même celui qui performe le mieux pour la configuration lidar souhaitée par le partenaire industriel.

# Chapitre 7

## Conclusion

Ce projet de maîtrise traite la problématique du pistage à une seule cible, ou de l'estimation d'états, pour la technologie lidar à état solide. À la différence des lidars rotatifs, la résolution angulaire des lidars à état solide est pour le moment limitée : les éléments (récepteurs lidar) possèdent un champ de vue de plusieurs degrés. Le défi est donc de considérer un bruit de mesure qui est à la fois gaussien (pour la position radiale) et uniforme (pour la position angulaire) et un système qui est non-linéaire en raison des mesures polaires.

Dans le chapitre 2, une revue de la littérature concernant le pistage pour lidar est faite. Peu d'articles traitent cependant de la problématique liée à la résolution angulaire des lidars à état solide. Ce survol traite donc aussi les filtres de Kalman classique, étendu et non parfumé. La nécessité d'un bruit gaussien pour le filtre de Kalman est expliquée par deux manières soit par le principe du MSE et du MAP. Puis, les adaptations existantes des filtres pour des mesures qui sont discrétisées et pour l'application de contraintes sur des états sont présentées. Puisqu'elle est utilisée dans ce travail, la transformée de Hough  $y$  est également introduite. La PHT, qui fait un rapprochement entre la transformée et le ML, et par extension le MAP, est présentée. La FHT, qui permet de réduire la complexité algorithmique de la transformée, est abordée.

C'est au chapitre 3 que l'adaptation de la transformée de Hough pour la géométrie polaire et la nature du bruit sur les mesures du lidar est développée. La transformée de Hough proposée souhaite s'approcher du MAP comme la PHT. Étant donné que la transformée est l'étape avec la complexité algorithmique la plus importante, des façons de la réduire sont aussi proposées.

Puis, au chapitre 4, plusieurs stratégies d'intégration de la transformée de Hough avec le filtre de Kalman sont présentées. Les deux types de stratégies sont les suivantes : 1) projeter les mesures sur la droite estimée par la transformée de Hough, 2) ajouter une contrainte relaxée de trajectoire dans le vecteur des observations du filtre de Kalman. Pour la projection des mesures, un EKF est d'abord proposé,  $EKF_H$ . Il est ensuite simplifié à un filtre de Kalman classique en transformant les mesures en coordonnées cartésiennes,  $KF_H$ . La projection des

mesures transforme le bruit uniforme sur la mesure de position angulaire en un bruit gaussien. Par contre, lorsque la mesure actuelle est sur le point le plus rapproché entre la droite de la trajectoire et le lidar, l'erreur sur la mesure projetée augmente significativement. Pour éviter ce problème, un UKF avec contrainte de trajectoire relaxée est élaboré,  $\text{UKF}_H$ . Une dernière approche est adaptée, soit celle d'appliquer une zone morte sur l'innovation.

Dans le chapitre 5, les trois filtres de Kalman présentés,  $\text{EKF}_H$ ,  $\text{KF}_H$  et  $\text{UKF}_H$  sont comparés entre eux et aux filtres EKF et UKF en référence pour une cible de la taille d'un piéton. La technique de la zone morte sur l'innovation est également comparée. Des données expérimentales permettent de vérifier le simulateur et les filtres développés avec un système lidar réel. Des simulations sont utilisées pour évaluer la précision de l'estimation d'états pour de nombreuses trajectoires rectilignes. Il est alors évident que le filtre  $\text{UKF}_H$  développé est plus performant que les autres filtres développés et de référence. Plus précisément, les améliorations suivantes sont observées par rapport au filtre de référence UKF :

- L'erreur quadratique moyenne de la position angulaire et de la direction de la vitesse est constante, que la cible s'approche ou s'éloigne du lidar. Elle est particulièrement inférieure au filtre de référence lorsque la cible s'éloigne et qu'elle est loin du lidar : dans ces cas, l'erreur d'estimation du filtre UKF augmente, car le filtre converge sur une mesure de position angulaire qui demeure constante.
- L'erreur quadratique moyenne du module de la vitesse est constante, que la cible soit près ou loin du lidar. Celle associée au filtre UKF de référence augmente en fonction de la distance de la cible.

De plus, la performance est similaire pour les deux filtres pour ce qui est de la position radiale. L'erreur quadratique moyenne pour la position radiale est d'ailleurs inférieure à l'écart-type du bruit de mesure et plus constante pour toutes les trajectoires lorsque le filtre non parfumé est utilisé, puisqu'il permet une approximation d'ordre supérieure que le filtre de Kalman étendu.

Le chapitre 6 montre des résultats de simulation pour des cibles de la taille d'une voiture et des trajectoires linéaires et courbes. On peut alors observer que l'augmentation de la taille des cibles par rapport à la taille des éléments rend le bruit de mesure davantage gaussien. Ainsi, le gain de l'utilisation de la transformée de Hough est moins important, malgré que le UKF demeure celui avec l'erreur sur l'estimation la plus faible en moyenne. Le même phénomène est observé lorsque la configuration du lidar est changée, de sorte que le gain devient plus intéressant pour une résolution de  $5^\circ$  et plus par élément lidar.

## 7.1 Travaux futurs

Dans ce travail, un algorithme d'estimation d'état est développé en considérant une seule piste lidar à la fois. La prochaine étape est donc de développer un algorithme pour associer les nouvelles détections aux pistes existantes ou à de nouvelles pistes. Dans [2], le principe du



pistage à hypothèses multiples (MHT, *multiple hypothesis tracking*) est utilisé pour pister des cibles devant un lidar rotatif. Un principe similaire pourrait être développé en se servant des informations de l'estimateur d'état développé dans ce mémoire ( $UKF_H$ ) : position et vitesse filtrées et droite estimée par la transformée de Hough. En effet, en plus d'être directement utilisée dans le filtre de Kalman, l'estimation de la droite par la transformée de Hough peut également servir à associer de nouvelles détections aux pistes existantes.

Ensuite, il serait bien entendu très intéressant d'implanter en temps réel le système de pistage complet. Puisqu'il faut calculer les états pour chaque cible vue par le lidar, la transformée de Hough doit être calculée pour chaque cible également, ce qui peut devenir lourd. Plusieurs stratégies ont été abordées dans ce mémoire pour réduire la complexité algorithmique de la transformée, mais il reste du travail à faire pour une implantation sur un FPGA et un microcontrôleur.

Afin de réduire davantage la complexité et le temps d'exécution, il serait possible de ne pas calculer la transformée à chaque instant, de diminuer la taille de la matrice des votes, la profondeur de l'historique ou encore le nombre de points sur la PDF du bruit gaussien de mesure de position radiale. Réduire ces paramètres à des valeurs inférieures à celles proposées pourrait diminuer les performances de la transformée de Hough. Il faut donc les optimiser selon la précision de l'estimation souhaitée.

Une autre façon de réduire la complexité serait de décider, selon la trajectoire que suit une cible et sa taille, si la transformée de Hough doit être utilisée ou non. En effet, pour lorsque le rapport entre la taille de la cible sur la largeur d'un élément est très grand, l'utilisation de la transformée de Hough n'entraîne pas un gain important sur l'estimation des états. Dans ces situations, il serait possible d'utiliser simplement le filtre de Kalman UKF sans l'ajout des contraintes. Il s'agit alors de la même structure, mais le vecteur d'observations est réduit en taille temporairement.