

Chapitre 5

Résultats pour cible de taille piéton

Dans ce chapitre, les différents filtres de Kalman proposés sont testés en simulation et avec des données expérimentales. Les filtres évalués sont les filtres de Kalman étendu et classique avec projection des mesures (EKF_H , KF_H) ainsi que le filtre de Kalman non parfumé dont le vecteur d'observations a été augmenté par une contrainte de trajectoire (UKF_H). L'effet de la zone morte sur l'innovation est également analysé pour le filtre UKF_H et pour les filtres de Kalman étendu (EKF) et non parfumé (UKF) sans transformée de Hough.

D'abord, des résultats sur des données expérimentales sont présentées afin de montrer l'allure générale du pistage, la vérité-terrain n'étant pas assez précise pour évaluer et comparer les performances des algorithmes. Ces données expérimentales permettent aussi de confirmer les résultats de simulation avec un système réel.

Ainsi, des simulations sont par la suite analysées afin d'évaluer et de comparer la précision des algorithmes proposés pour des trajectoires rectilignes.

5.1 Paramètres

Pour les données expérimentales et pour les simulations, les paramètres utilisés pour le calcul de la transformée de Hough sont ceux décrits dans le tableau 3.2 et l'initialisation des filtres de Kalman ainsi que les valeurs des matrices de covariances sont faites tel qu'expliqué dans les sections 4.9 et 4.10.

Les coefficients pour la génération des points sigma dans les filtres de Kalman non parfumés sont les suivants : $\alpha = 0.001$, $\beta = 2$ et $\kappa = 0$ [11].

5.2 Données expérimentales

Dans cette section, quelques séquences réelles d'acquisition avec un système lidar sont présentées. Les données du lidar sont traitées par la suite avec les filtres de Kalman proposés : KF_H

(projection des mesures) et UKF_H (ajout d'une contrainte dans le vecteur des observations). En référence, ces résultats sont comparés avec ceux des filtres de Kalman étendu et non parfumé de référence, soit sans transformée de Hough ni zone morte. L'objectif de cette section est de valider les filtres proposés avec des données réelles. L'évaluation de la performance est plutôt faite dans la prochaine section.

Les mesures expérimentales sont prises avec un système lidar possédant la configuration suivante : $N = 16$ éléments, $\Delta\phi = 2.8^\circ$ pour chaque élément et les trames sont acquises à une fréquence de 50 Hz. Il s'agit d'un lidar disponible qui n'est pas celui finalement déployé par notre partenaire industriel. En simulation, davantage de configurations sont testées, notamment la configuration souhaitée, avec des éléments plus larges, est analysée en détail.

Comme la vitesse et position réelles de la cible ne sont pas connues, seulement l'allure de la trajectoire filtrée est comparée avec celle mesurée. L'évaluation de la précision sur l'estimation de la position et de la vitesse est plutôt évaluée dans la prochaine section. Ici, deux situations sont présentées : une trajectoire rectiligne traversant tous les éléments du lidar (comme un piéton qui traverse une intersection) et une trajectoire courbe.

À la figure 5.1, un piéton traverse en diagonale devant le lidar. À la figure 5.2, le piéton traverse en effectuant plutôt un arc de cercle. Aux trois instants illustrés pour les deux situations, la droite estimée par la transformée de Hough, ainsi que les positions et vecteurs vitesses estimés par les filtres de Kalman sont montrés. Il est possible de remarquer que, malgré la courbure de la trajectoire dans la figure 5.2, l'estimation de la droite par la transformée de Hough réussit à suivre la tangente aux mesures les plus récentes (considérant une incertitude de la largeur d'un élément sur les mesures angulaires).

5.3 Simulations de trajectoires rectilignes

Dans cette section, les filtres de Kalman proposés (EKF_H , KF_H et UKF_H) sont évalués selon la précision de l'estimation pour différentes configurations lidars et différentes trajectoires rectilignes. Pour ce faire, des trajectoires rectilignes sont simulées dans Matlab, de la même façon que présentée dans la section 3.4.2.

L'évaluation de la performance des filtres proposés se base sur la précision de l'estimation des états suivants :

- la position radiale ;
- la position angulaire ;
- la direction de la vitesse ;
- le module de la vitesse.

Les états estimés par les filtres proposés sont cependant en coordonnées cartésiennes tel que discuté précédemment, et convertis par après. Le choix de représenter l'erreur en coordonnées

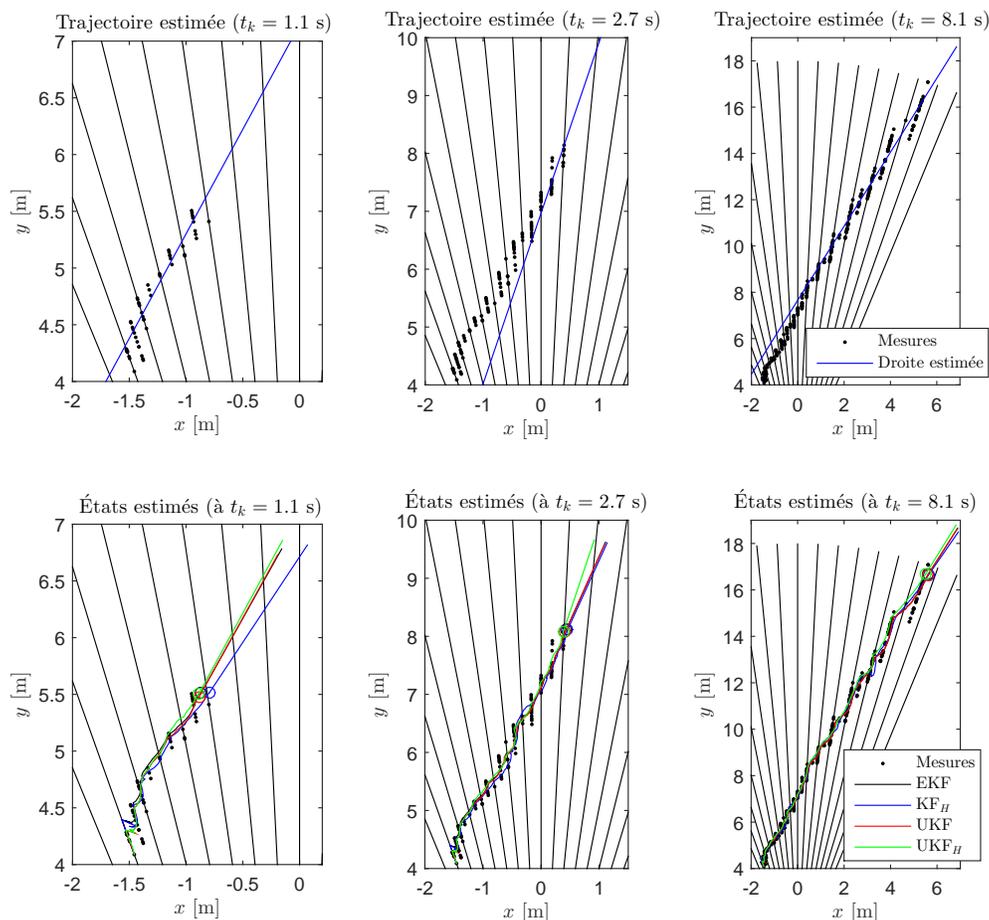


FIGURE 5.1 – Données expérimentales d’un piéton se déplaçant en ligne droite devant le lidar. Illustration de la trajectoire estimée par la transformée de Hough et des états estimés par les filtres de Kalman à trois instants différents.

polaires plutôt que cartésiennes est motivé par la facilité de visualisation pour un lecteur. Aussi, il est plus facile de comparer ces résultats avec les caractéristiques géométriques initiales du lidar.

L’évaluation de la précision se fait en calculant l’erreur quadratique moyenne sur le paramètre observé par rapport à la valeur exacte. La position exacte de la cible correspond à son centre de masse.

5.3.1 Résultats pour différentes configurations lidars

Les courbes d’erreurs quadratiques moyennes présentées dans cette section sont moyennées pour 18^2 trajectoires rectilignes différentes pour une cible de taille $0.5 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$. La cible

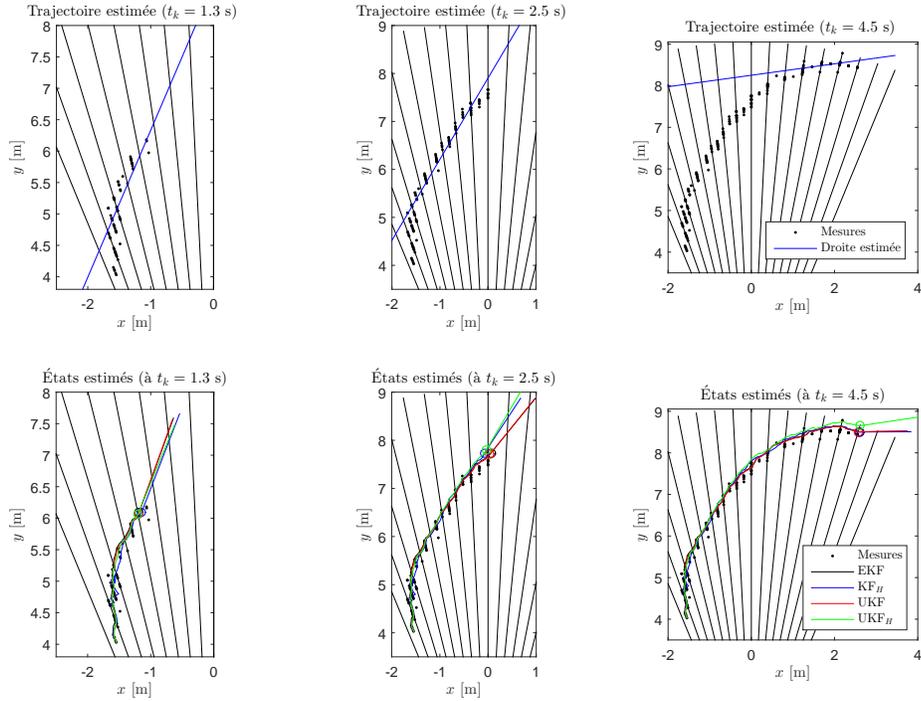


FIGURE 5.2 – Données expérimentales d'un piéton se déplaçant en arc de cercle devant le lidar. Illustration de la trajectoire estimée par la transformée de Hough et des états estimés par les filtres de Kalman à trois instants différents.

traverse tous les éléments et les points d'entrée et de sortie de la cible dans le lidar sont situés à des distances variant par bonds de 5 m entre 10 et 100 m du lidar. La vitesse relative de la cible est constante et fixée à 36 km/h et un bruit d'écart-type de 0.1 m est ajouté à la position radiale mesurée.

Les filtres de Kalman comparés sont les suivants : étendu sans modification (EKF), non parfumé sans modification (UKF), étendu avec mesures projetées (EKF_H , 4.4), classique avec mesures projetées (KF_H , 4.5) et non parfumé avec contrainte dans le vecteur d'état (UKF_H , 4.7).

Pour la traversée des deux premiers éléments, l'estimation de la trajectoire par la transformée de Hough n'est pas utilisée, car l'erreur, due à l'incertitude sur la position angulaire, est très importante.

La première configuration lidar testée est la même que pour les mesures expérimentales : soit $N = 16$ éléments avec un champ de vue de $\Delta\phi = 2.8^\circ$ chacun. Pour ce qui est de l'estimation de la position radiale et angulaire, les filtres de Kalman non parfumés, que ce soit avec ou sans transformée de Hough, donnent une erreur inférieure aux autres en raison de l'approximation

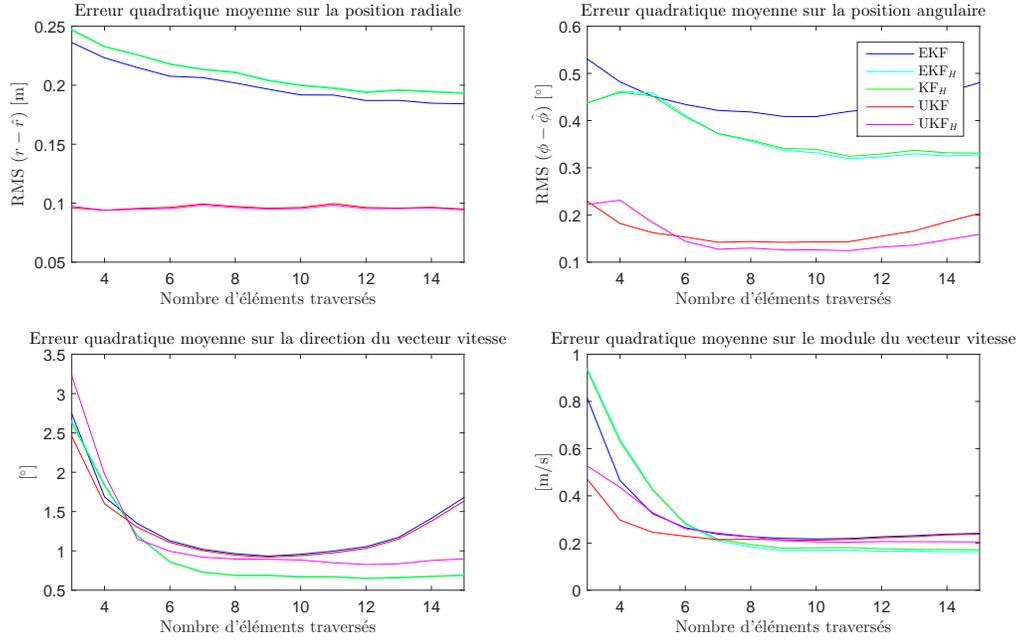


FIGURE 5.3 – Erreur quadratique des états estimés moyennée pour toutes les trajectoires rectilignes testées (cible $0.5 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$). Pour la configuration lidar $N = 16$ et $\Delta\phi = 2.8^\circ$.

par la série de Taylor qui est d'ordre supérieur pour le non parfumé.

Pour cette configuration lidar, comme chaque élément a un champ de vue de 2.8° seulement, le gain de l'utilisation de la transformée de Hough est faible. La position angulaire est déjà estimée avec une erreur inférieure au degré, quel que soit le filtre utilisé.

Le gain le plus important observé est celui sur l'estimation de la direction de la cible (orientation de son vecteur vitesse) : dans les derniers éléments, un gain sur l'erreur de presque 1° en moyenne est observé entre les filtres de référence (EKF, UKF) et les filtres avec mesures projetées (EKF_H, KF_H).

Une observation importante à faire est que pour les filtres de référence, l'erreur quadratique sur la direction augmente en moyenne lors de la traversée des derniers éléments. Cela est dû aux situations où la trajectoire commence près du lidar et se termine à une distance plus importante ($r_1 < r_N$) : à la fin, les mesures demeurent longtemps dans les mêmes éléments. Alors que les filtres avec transformée de Hough ont déterminé avec certitude la trajectoire de la cible, les filtres de référence se fient uniquement aux mesures du lidar qui, lorsque la cible s'éloigne, sont de moins en moins précises. Ces situations sont discutées et représentées plus en détail dans la prochaine section.

La seconde configuration lidar évaluée est composée de 8 éléments avec un champ de vue de $\Delta\phi = 5^\circ$ chacun. Pour cette configuration, étant donné l'incertitude sur la mesure angulaire

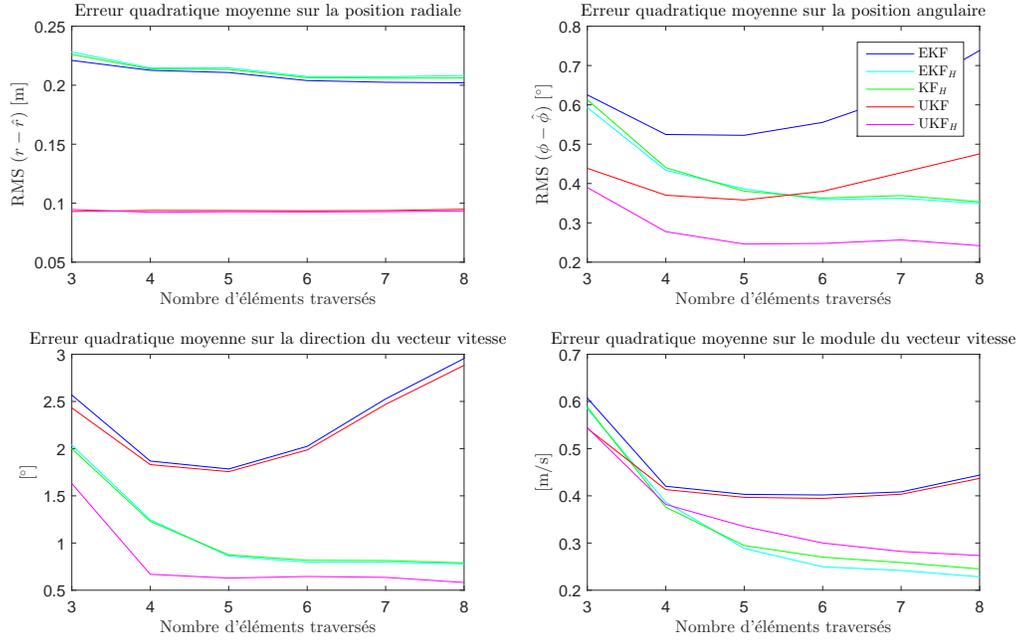


FIGURE 5.4 – Erreur quadratique des états estimés moyennée pour toutes les trajectoires rectilignes testées (cible $0.5 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$). Pour la configuration lidar $N = 8$ et $\Delta\phi = 5^\circ$.

qui est plus élevée, le gain entre les filtres proposés et ceux de référence est plus important. Notamment, pour le filtre UKF_H , l'erreur quadratique moyenne sur la direction, après 3 éléments traversés, est de moins de 1° , alors que ceux de référence augmentent au fil du temps de 2 à 3° .

Finalement, la dernière configuration lidar testée est celle à 9 éléments avec un champ de vue de $\Delta\phi = 10^\circ$ pour chaque élément. On peut remarquer en comparant avec les autres configurations testées que le gain lié à l'utilisation de la transformée de Hough augmente lorsque l'incertitude sur la mesure angulaire augmente. Pourtant, à la section 3.4.2, il est vu que les performances de la transformée de Hough restent similaires entre ces configurations lidars. Il s'agit plutôt de la performance du filtre de Kalman (étendu ou non parfumé) qui se dégrade lorsque l'incertitude, ou le bruit uniforme par rapport au bruit gaussien, sur la mesure angulaire augmente. Dans cette configuration, soit celle visée pour le déploiement du lidar de notre partenaire industriel, l'erreur quadratique moyenne sur tous les états est inférieure (ou égale en \hat{r}) pour le filtre UKF_H . De plus, il est vu dans la prochaine section, que les performances du filtre UKF_H sont plus égales selon toutes les trajectoires également, alors que les performances des autres filtres varient selon le rapport entre r_1 et r_N .

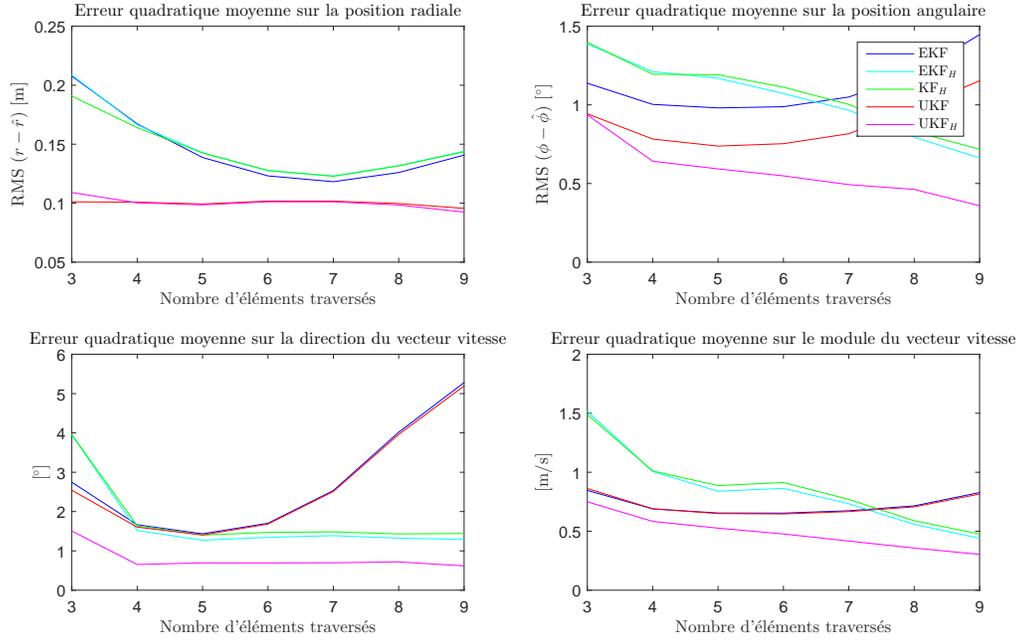


FIGURE 5.5 – Erreur quadratique des états estimés moyennée pour toutes les trajectoires rectilignes testées (cible $0.5 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$). Pour la configuration lidar $N = 9$ et $\Delta\phi = 10^\circ$.

5.3.2 Résultats pour différentes trajectoires

Dans cette section, les résultats sont analysés en fonction de la trajectoire de la cible, et ce pour une seule configuration lidar, soit celle visée par le partenaire industriel. Il s'agit de celle avec des éléments dont le champ de vue est de $\Delta\phi = 10^\circ$.

Les figures présentées dans cette sous-section illustrent, pour 280^2 trajectoires rectilignes uniformes différentes, l'erreur quadratique moyennée pendant que le centre de masse de la cible traverse un élément lidar. La cible traverse tous les éléments du lidar et les points d'entrée (r_1) et de sortie (r_9) de la cible dans le lidar sont situés à des distances variant par bonds de 0.5 m entre 10 et 150 m du lidar. La vitesse relative de la cible est fixée à 36 km/h et un bruit d'écart-type de 0.1 m est ajouté à la position radiale mesurée, comme à la sous-section précédente.

Les filtres de Kalman comparés sont les suivants : étendu sans modification (EKF), étendu avec zone morte (EKF_{dz}), non parfumé sans modification (UKF), non parfumé avec zone morte (UKF_{dz}), étendu avec mesures projetées (EKF_H, 4.4), classique avec mesures projetées (KF_H, 4.5), non parfumé avec contrainte dans le vecteur d'état (UKF_H, 4.7) et non parfumé avec contrainte dans le vecteur d'état et zone morte (UKF_{H, dz}).

Avant les trois premiers changements d'éléments, l'estimation de la trajectoire par la transformée de Hough (paramètres de distance ρ et de direction θ) ainsi que la zone morte sur

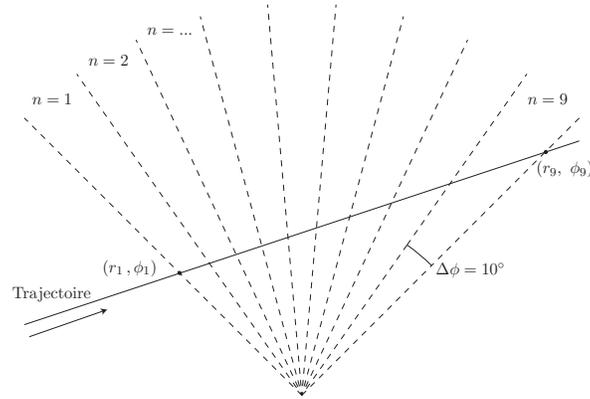


FIGURE 5.6 – Schéma des paramètres utilisés pour la simulation des trajectoires rectilignes.

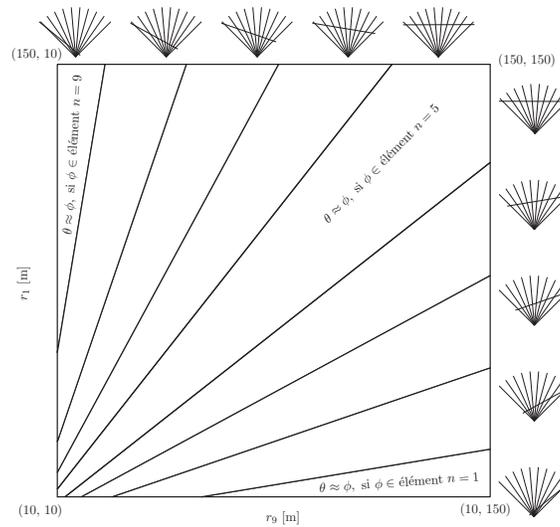


FIGURE 5.7 – Représentation de la structure de la matrice des résultats résumant toutes les trajectoires simulées.

l'innovation ne sont pas utilisées, car l'erreur sur l'estimation de la trajectoire est très importante et la zone morte augmente l'erreur lorsqu'elle est utilisée dès le début.

Un exemple de trajectoire est illustré à la figure 5.6 et la structure de la matrice des résultats, qui résume pour toutes les trajectoires, est représentée à la figure 5.7. Les zones où $\theta \approx \phi$, qui sont problématiques pour la projection des mesures (EKF_H et KF_H) sont mises en évidence. Ainsi, dans la matrice des résultats pour l'élément n , les filtres utilisant la projection devraient avoir une erreur plus grande dans la région $\theta \approx \phi$ où ϕ est un angle correspondant à l'élément n . Par exemple, pour l'intervalle de temps où la cible traverse le 5^e élément lidar, l'erreur pour les filtres avec projection devrait être plus importante autour de la diagonale principale.

La figure 5.8 illustre l'erreur quadratique moyenne sur l'estimation de la position radiale lorsque la cible traverse le dernier élément lidar. Il est alors évident que les filtres de Kalman

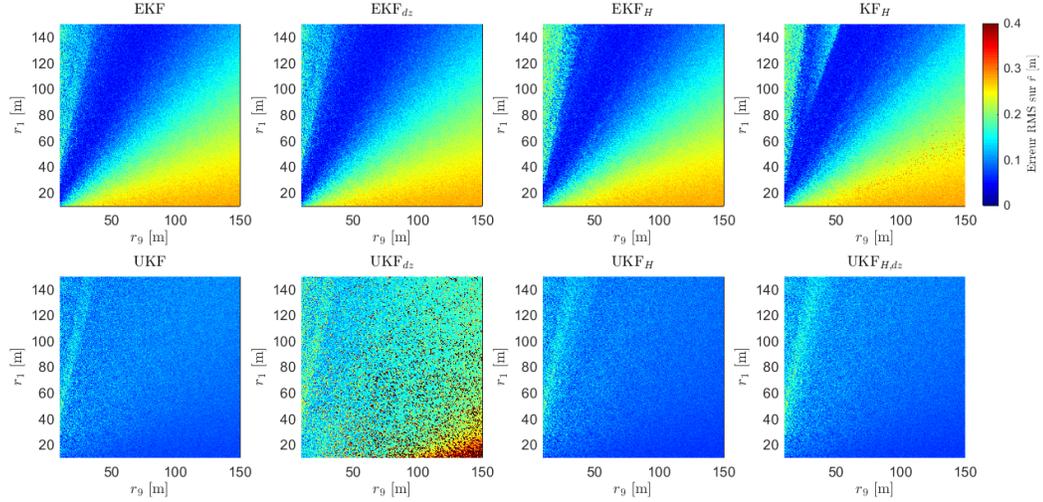


FIGURE 5.8 – Erreur quadratique moyenne sur l’estimation de la position radiale pour les huit filtres testés (moyennée pendant que la cible traverse l’élément $n = 9$ du lidar).

de type UKF (avec et sans transformée de Hough) sont plus performants, et leur performance est plus égale selon les trajectoires, que les filtres EKF ou KF. Cela peut être expliqué par la non-linéarité de la fonction $h(\cdot)$ qui transforme les états prédits en mesures en coordonnées polaires : le filtre de Kalman non parfumé fait une approximation d’ordre supérieure que le filtre étendu. Même si l’échantillonnage est rapide (la cible se déplace peu entre deux mesures), on voit que la différence entre le UKF et le EKF s’accroît dans les zones où le bruit sur les mesures est plus élevé¹. Le filtre de Kalman classique KF_H fait également une approximation de la densité de probabilité qui réduit la géométrie polaire en cartésienne.

Aussi, il est possible de voir que l’erreur est plus importante et inégale pour le filtre UKF_{dz} (avec zone morte). Il est préférable d’avoir une erreur dont l’ordre de grandeur est connu, soit un filtre dont le résultat est prédictible, surtout lorsque la sortie de ce filtre est une information utilisée pour la détection de collisions sur la route. Dans le cas du filtre UKF_{dz} , l’erreur sur l’estimation de la position radiale de la cible serait difficile à prévoir, car elle varie beaucoup selon les trajectoires, et cela, sans tendance apparente (voir la variation d’intensité aléatoire pour des pixels adjacents dans le graphique UKF_{dz} de la figure 5.8).

La figure 5.9 représente l’erreur quadratique moyenne pour l’estimation de la position angulaire lorsque la cible traverse l’élément $n = 4$. Pareillement, la figure 5.9 montre cette erreur quadratique moyenne lorsque la cible traverse le dernier élément.

Les graphiques concernant les filtres EKF_H et KF_H démontrent que l’erreur est effectivement plus importante dans la zone $\theta \approx \phi$, en raison de la méthode de projection des mesures qui y

1. C’est-à-dire lorsque la cible est loin du lidar (grande incertitude angulaire) et lorsque l’estimation de Hough est moins bonne ($r \approx \rho$ ou $\theta \approx \phi$).

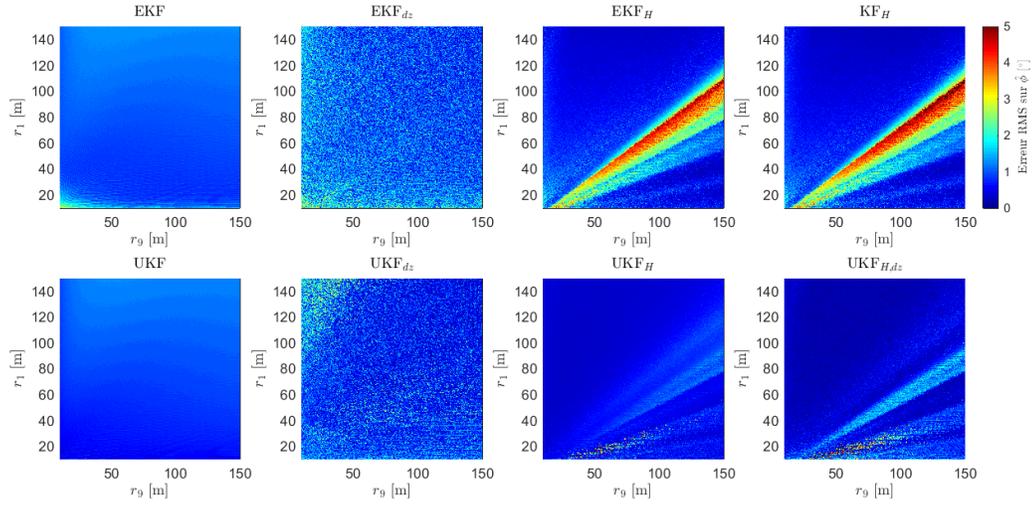


FIGURE 5.9 – Erreur quadratique moyenne sur l'estimation de la position angulaire pour les huit filtres testés (moyennée pendant que la cible traverse l'élément $n = 4$ du lidar).

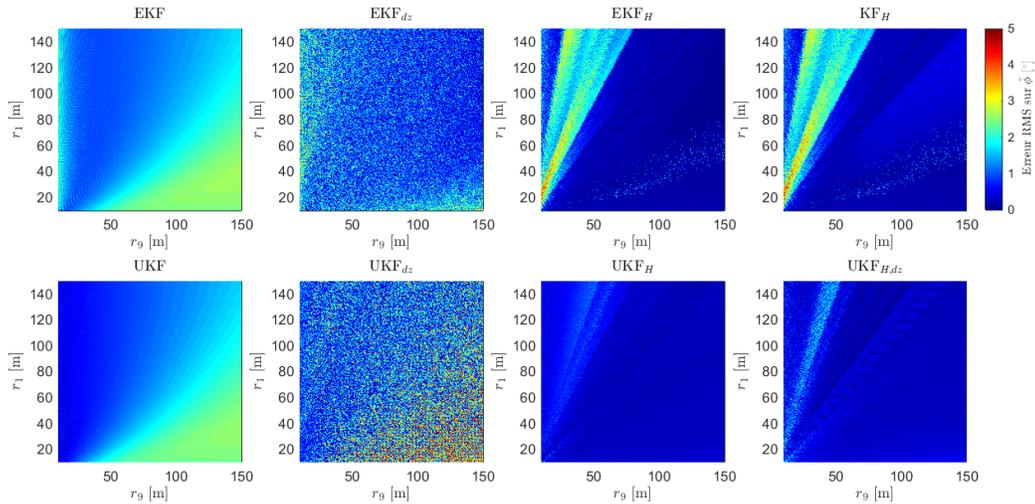


FIGURE 5.10 – Erreur quadratique moyenne sur l'estimation de la position angulaire pour les huit filtres testés (moyennée pendant que la cible traverse l'élément $n = 9$ du lidar).

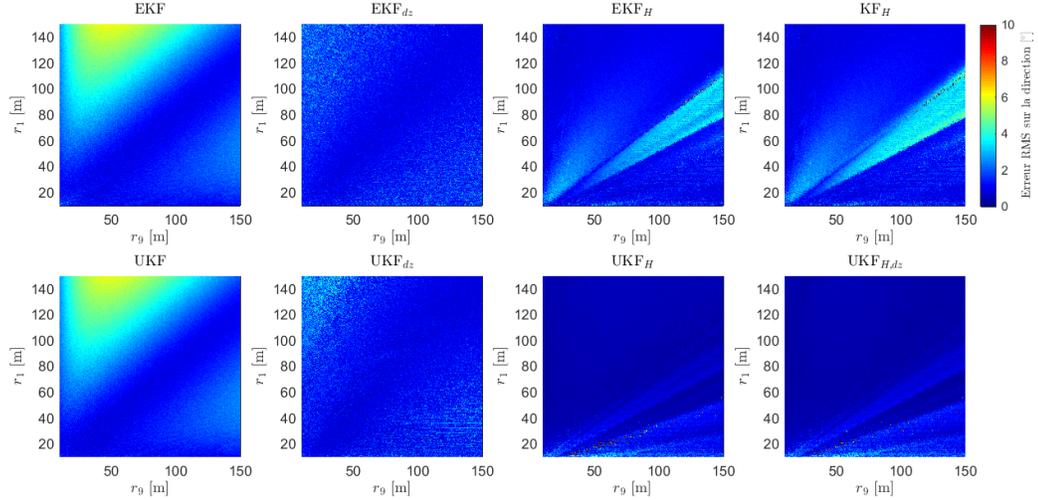


FIGURE 5.11 – Erreur quadratique moyenne sur l’estimation de la direction du vecteur vitesse pour les huit filtres testés (moyennée pendant que la cible traverse l’élément $n = 4$ du lidar).

est inefficace comme discuté dans la section 4.2.1. En dehors de cette zone, l’erreur quadratique moyenne est toutefois inférieure à celle des filtres de référence EKF et UKF. Ce problème est beaucoup moins présent pour le filtre UKF_H .

En comparant les deux figures 5.9 et 5.10 pour les filtres de référence, l’augmentation de l’erreur dans les derniers éléments lorsque la cible s’éloigne du lidar devient évidente. Il s’agit des trajectoires dans le triangle inférieur de la matrice des résultats (séparé par la diagonale principale $r_1 = r_9$), où $r_1 < r_9$. Pour les filtres proposés, cette augmentation globale de l’erreur quadratique moyenne n’existe pas.

Comme pour la position radiale, les résultats pour les filtres avec zone mortes donnent des résultats très variables d’une trajectoire à l’autre, même pour des trajectoires similaires (pixels adjacents).

C’est plutôt dans les figures 5.11 et 5.12 concernant la direction du vecteur de vitesse estimé que l’on voit l’effet positif de la zone morte. La réduction de l’erreur dans les zones où l’erreur est importante pour les filtres de référence est alors évidente. Cependant, même pour ces états, le filtre non parfumé avec transformée de Hough (UKF_H) présente une erreur inférieure.

Il est d’ailleurs très intéressant de remarquer que le filtre UKF_H présente ses meilleures performances surtout dans la zone où les filtres de Kalman de référence sont les moins performants. En pratique, cela correspond à la situation où la cible est à mi-parcours et qu’elle s’approche du lidar en traversant les capteurs (voir la trajectoire à la figure 5.14 et sa variation de la vitesse estimée à la figure 5.15) ; ou encore à la situation où la cible est à la fin de son parcours dans le lidar et qu’elle s’éloigne du lidar (voir la position estimée à la figure 5.13). En fait,

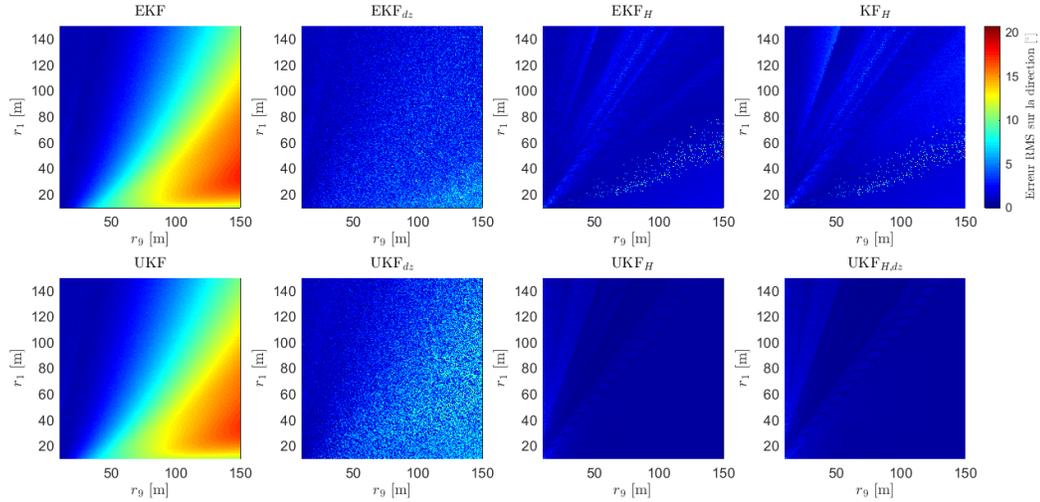


FIGURE 5.12 – Erreur quadratique moyenne sur l'estimation de la direction du vecteur vitesse pour les huit filtres testés (moyennée pendant que la cible traverse l'élément $n = 9$ du lidar).

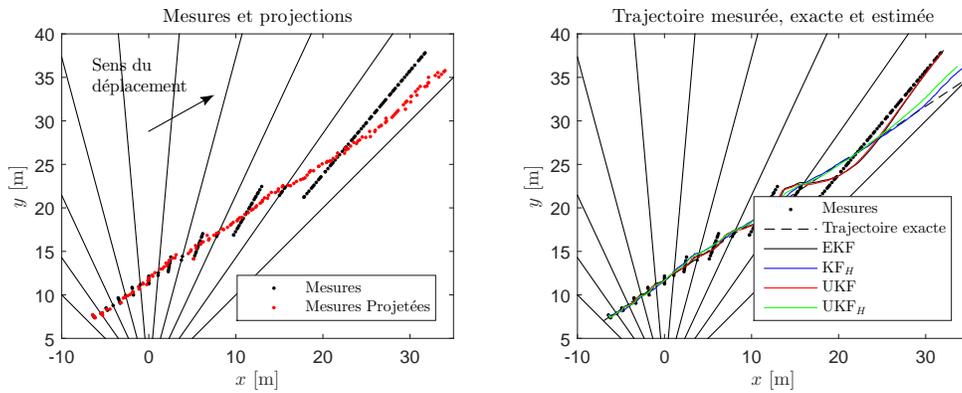


FIGURE 5.13 – Exemple de situation où le filtre de Kalman avec transformée de Hough est particulièrement plus performant (au dernier élément de droite du lidar).

les filtres de référence performant bien lorsque la cible traverse plusieurs éléments en peu de mesures, car ils n'ont pas le temps de converger sur des mesures angulaires stationnaires.

Pour que le filtre de référence se fie moins aux mesures, il faudrait diminuer la matrice de covariance du modèle (Q). Cependant, garder un équilibre entre le poids des mesures et du modèle est important : si la cible effectue un changement de direction rapide ou une accélération importante, seulement les mesures en témoignent.

L'avantage de la transformée de Hough est qu'elle estime la meilleure droite correspondant à la trajectoire en prenant en compte l'incertitude sur la position angulaire des mesures. Cette estimation est faite en se limitant aux droites passant par la mesure actuelle et elle s'approche du maximum de vraisemblance. De plus, la transformée de Hough n'est pas affectée

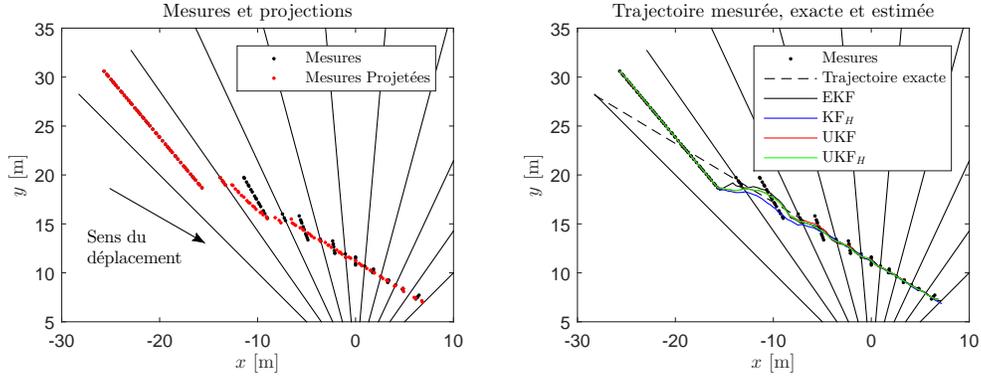


FIGURE 5.14 – Exemple de situation où le filtre de Kalman avec transformée de Hough est particulièrement plus performant (au centre du lidar).

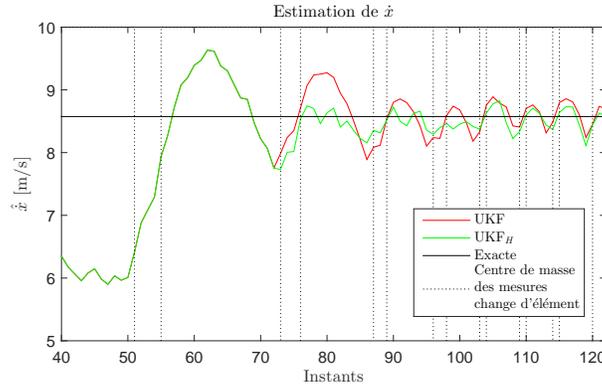


FIGURE 5.15 – Vitesse en x estimée en fonction du temps pour les filtres UKF et UKF_H. Les instants où la moyenne de la position angulaire des mesures change sont indiqués en pointillés. Trajectoire illustrée à la figure 5.14.

par l'accélération de la cible : elle ne considère que la trace des mesures dans le lidar. Ainsi, le pire résultat possible, soit lorsque la cible effectue un changement de direction avec un rayon de courbure très petit, est d'être trop conservateur sur le changement de direction. La contrainte ajoutée dans le vecteur des observations respecte néanmoins la mesure actuelle. En fait, tel que vu à la figure 3.25, l'estimation faite par la transformée de Hough pour une trajectoire courbe pourrait être tout à fait exacte étant donné l'incertitude sur la mesure de position angulaire.

Pour ce qui est du module de la vitesse aux figures 5.16 et 5.17, les filtres de Kalman de référence (EKF, UKF) présentent une erreur augmentant en fonction de la distance de la cible par rapport au lidar. La zone morte ainsi que le filtre UKF_H, comme pour la direction, améliorent grandement l'estimation du module de la vitesse. Cependant, dans l'élément $n = 4$, il est possible de remarquer pour le filtre UKF_H une zone où la performance varie beaucoup. Cette variation est due à l'estimation de ρ et θ qui est mauvaise dans cette zone pendant le

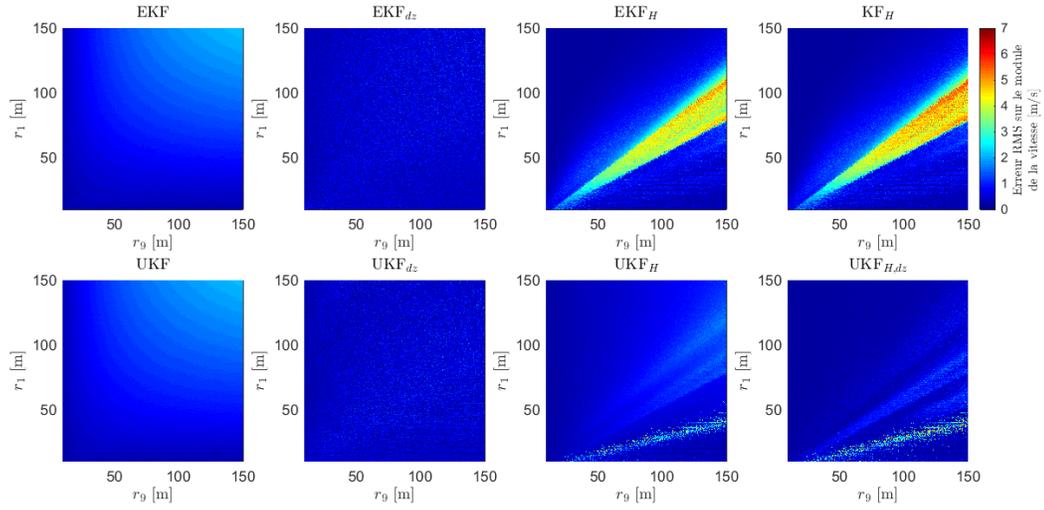


FIGURE 5.16 – Erreur quadratique moyenne sur l'estimation du module du vecteur vitesse pour les huit filtres testés (moyennée pendant que la cible traverse l'élément $n = 4$ du lidar).

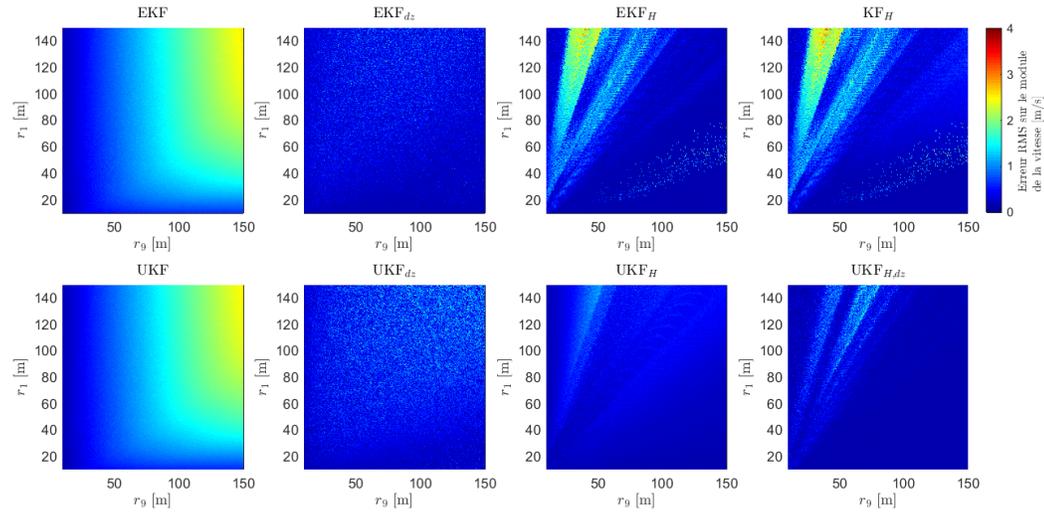


FIGURE 5.17 – Erreur quadratique moyenne sur l'estimation du module du vecteur vitesse pour les huit filtres testés (moyennée pendant que la cible traverse l'élément $n = 9$ du lidar).

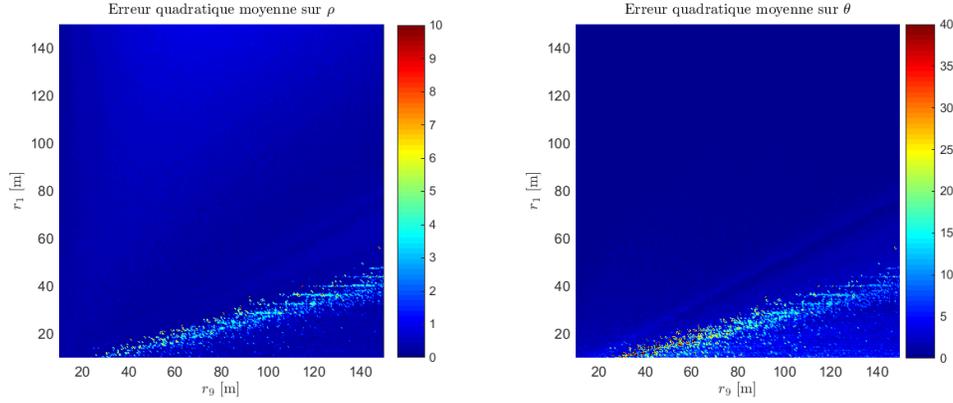


FIGURE 5.18 – Erreur quadratique moyenne sur l’estimation des paramètres de la trajectoire par transformée de Hough (moyennée pendant que la cible traverse l’élément $n = 3$ du lidar). L’erreur sur le paramètre θ est exprimée en degrés et celle sur le paramètre ρ en mètres.

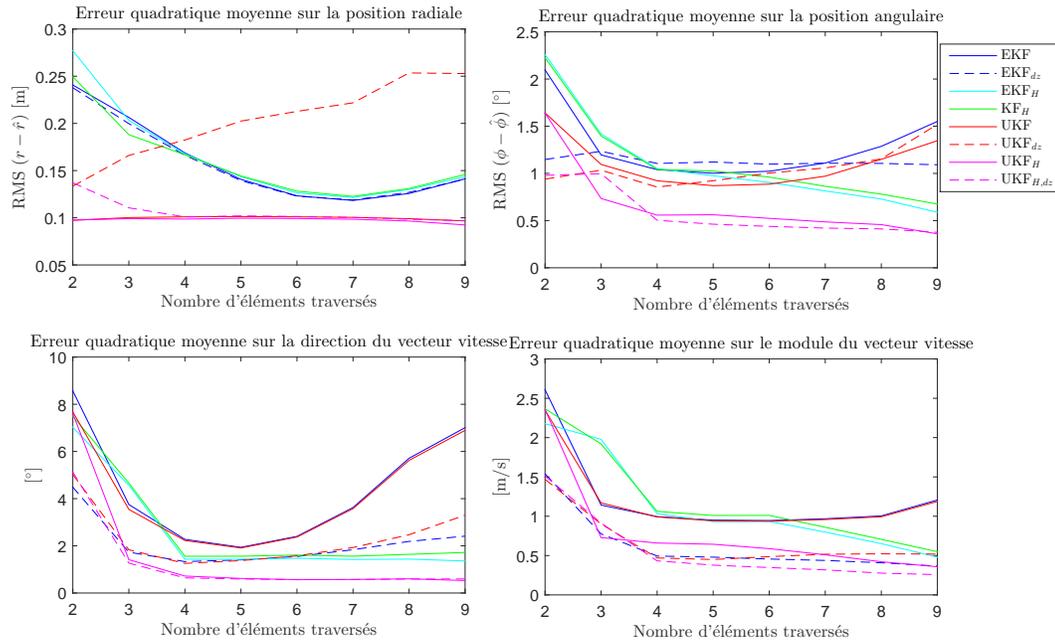


FIGURE 5.19 – Erreur quadratique moyenne sur l’estimation des états de la cible en fonction du nombre d’éléments traversés et pour l’ensemble des filtres testés.

passage de la cible dans l’élément précédent $n = 3$ (voir 5.18). Cette mauvaise estimation est due à l’ambiguïté entre deux régions maximales dans la matrice des votes de la transformée de Hough. Cette ambiguïté disparaît pour l’estimation de la trajectoire dans l’élément $n = 4$ et pour l’estimation des états dans les éléments suivants $n = 4$.

Les courbes en fonction du nombre d’éléments traversés moyennées pour toutes les trajectoires sont illustrées à la figure 5.19.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, les filtres proposés sont testés pour le pistage de piétons avec des données expérimentales ainsi que des simulations. Les données expérimentales permettent de voir comment la transformée de Hough et les filtres de Kalman se comportent pour une trajectoire rectiligne et une trajectoire courbe. La transformée de Hough semble bien estimer la tangente à la trajectoire même si cette dernière varie au fil du temps (comme pour une trajectoire courbe). Il est aussi possible d'observer que la transformée priorise les mesures récentes dans l'estimation de la tangente.

Les simulations permettent de conclure que le filtre de Kalman non parfumé dont le vecteur d'observation est augmenté par la droite estimée, UKF_H , est celui qui présente les meilleures performances pour des trajectoires rectilignes. De plus, il est celui dont les performances sont les plus constantes (similaires pour toutes les trajectoires testées) et produit même ses meilleurs résultats dans les conditions où les filtres de référence, EKF et UKF ordinaires, sont les moins bons. Alors que l'erreur sur l'estimation de la position angulaire et de la direction pour les filtres ordinaires augmente lorsque la cible s'éloigne, celle du filtre UKF_H demeure constante et inférieure. Le module de la vitesse est également affecté par la distance de la cible pour les filtres ordinaires, ce qui n'est pas le cas pour le filtre UKF_H .

Pour ce qui est de la zone morte, même si en moyenne elle semble aider l'estimation de la vitesse, elle produit des résultats très variables et difficiles à prévoir.

Dans le prochain chapitre, les filtres de Kalman sont testés pour le pistage de cibles de la taille de voitures.