

## **Appontage automatique de drones hélicoptères sur navire**

**Jean-Paul WASSON, Julien MORESVE**

DCNS – Ingénierie Navire Armé

### **SOMMAIRE**

La mise en œuvre des aéronefs sans pilote constitue probablement l'un des grands défis technologiques de notre temps.

Nous donnerons ici des éléments de contexte, des rappels sur les contraintes de l'appontage pour les hélicoptères sur un navire, puis nous énoncerons les principes de fonctionnement d'un système d'appontage automatique, son procédé, ses performances. Enfin des exemples d'activité de simulation et d'essais, indispensables à la mise au point de tels systèmes, seront décrits pour apprécier les effets dominants, les limites de l'exercice mais aussi les formidables possibilités ouvertes par cette clé technologique.

### **SUMMARY**

The development of Unmanned Aerial Vehicles is surely a big challenge nowadays.

You will find in this document the context of operational use of UAV on warships, the requirements needed to deck on a naval platform, and the development of an automatic decking system, how it works and what is its performance. Finally, are described some examples of simulation and tests performed needed to finalize such a system, the limits but also the formidable potential of this technology.

## 1. CONTEXTE

Les drones sont des véhicules inhabités susceptibles de remplir des missions de service public, de renseignements ou encore d'actions en milieu difficile. Ils permettent de soustraire l'homme de la permanence et du danger sur zone, ont un faible coût d'acquisition et d'utilisation, sont discrets et flexibles. Pour les Marines, les drones offrent aux navires qui en sont équipés la possibilité de disposer de capteurs déportés faciles à déployer.

Les drones aériens apportent une plus-value capacitaire de surveillance de l'espace aéro-maritime. Ils constituent une évolution majeure des systèmes navals et DCNS, dans son rôle de maître d'œuvre d'ensemble de navires armés, se doit de les intégrer.

Les drones aériens à voilure tournante (hélicoptères) peuvent être mis en œuvre facilement sur des navires, même petits, et apparaissent particulièrement adaptés à la lutte contre la piraterie.

Jusqu'à présent, le nombre de drones de ce type réellement opérationnels et les difficultés de lancement, et surtout de récupération, ont limité leur déploiement opérationnel et sûr à partir de navires.

Les expérimentations menées montrent les étapes de cette difficile évolution :

En 2006, Northrop Grumman a réalisé un appontage de son drone Firescout par beau temps sur un gros destroyer porte hélicoptère de l'US Navy avec le système UCARS (basé sur un capteur radar). Une nouvelle campagne d'essais devrait prochainement être menée.

En France, dans le cadre du PEA (Programme d'Etudes Amonts) SAA de 2006, SIREHNA a simulé l'appontage d'un petit drone Yamaha sur un pont fictif en utilisant un GPS RTK.

En 2007 et 2008, Schiebel a réalisé plusieurs appontages de son drone CAMCOPTER S-100 sur des navires indiens, espagnols et allemands grâce à un pilote manoeuvrant le drone, puis grâce à un système automatique de suivi du navire basé sur le GPS.

Même s'il s'agit d'une utilisation purement terrestre, il faut noter aussi la démonstration en

2008 d'un atterrissage automatique du drone à aile fixe Watchkeeper grâce au radar Magic Atol de Thales.

DCNS estime pour sa part qu'une étape indispensable restait à franchir : obtenir une précision de poser inférieure au mètre, par un état de mer 5. Pour disposer d'une capacité d'appontage automatique sur ses navires proposés à l'export, DCNS a donc développé un système original et très simple utilisant une mesure de position précise grâce à un capteur infrarouge ; il guide et pose le drone avec une précision mesurée de 30 cm pour harponner à coup sûr la grille d'appontage située sur le pont d'envol du navire, ce qui apporte une bonne sécurisation de l'aéronef une fois posé (risque de basculement sous l'effet du roulis).

L'apport de l'automatisme pour cette manœuvre est double.

Il permet d'abord d'obtenir une très haute probabilité de réussite du poser sur la grille, en dépit des mouvements du navire et des turbulences aérodynamiques générées par ses superstructures à proximité immédiate du pont d'envol. Un éventuel pilote humain opérant depuis le pont, ne percevant pas les accélérations de l'aéronef, ne pourrait anticiper avec suffisamment de réactivité et corriger ainsi les écarts de trajectoire du drone.

Il permet enfin d'envisager une équipe de mise en œuvre à coût réduit, en supprimant l'obligation de présence d'un pilote qualifié et l'entraînement qui lui est nécessaire.

Une démonstration probante a été effectuée en octobre 2008. Pour remporter ce succès, DCNS a travaillé en étroite coopération avec la société autrichienne Schiebel qui réalise le CAMCOPTER S-100, drone avec lequel la démonstration a été faite. Grâce à cette innovation, DCNS répond aux attentes des marines en offrant une solution intégrée au navire pour la mise en œuvre de drones de type hélicoptère. Préparation, décollage, conduite, exploitation et appontage en constituent les différents volets pour une intégration efficace sur un navire armé.

Les développements réalisés seront aussi utilisés dans le cadre du PEA D2AD que DCNS et THALES ont remporté, et qui vise

un système d'appontage et d'atterrissage tout automatique respectant les normes OTAN pour les futurs drones SDAM et SDT prévus pour la Marine Nationale et l'Armée de Terre.



Figure 1 : Le drone US Firescout de Northrop Grumman

## 2. RAPPEL DES CONTRAINTES A L'APPONTAGE ET PRINCIPES ASSOCIES

### 2.1. Contraintes de sécurisation

La sécurisation des aéronefs est une contrainte majeure pour l'appontage automatique. En effet l'aéronef ne peut rester qu'un court instant mécaniquement désolidarisé du pont qui l'accueille, sous peine de glisser, rouler ou basculer par mer forte (fortes rafales et mouvements de navire).

Il existe à l'heure d'aujourd'hui 3 systèmes de sécurisation d'un hélicoptère sur un pont d'envol :

- Le système américain RAST à base de câble tendu entre le pont et le treuil d'un hélicoptère.
- Le système canadien ASSIST qui fait déplacer un point d'amarrage avec un chariot sur le pont d'envol, à partir des mesures d'un capteur d'appontage
- Le système de DCNS basé sur une grille d'appontage de 2,4m de diamètre, fixée sur le pont du navire et un harpon fixé à l'hélicoptère.

Le troisième système est le plus répandu car le plus facile à mettre en œuvre dans un contexte naval (simplicité, robustesse). Les grilles d'appontage sont maintenant standardisées par l'OTAN.



Figure 2 : Fort mouvement de frégate

Le harpon est un vérin qui possède une tête munie d'un verrou. Il se déploie lorsque l'hélicoptère est posé au dessus de la grille et sécurise alors mécaniquement l'hélicoptère sur le pont d'envol.



Figure 3 : Harpon verrouillé dans une grille d'appontage

Cette contrainte impose donc un appontage de précision (environ 1 m de précision) sur le pont d'envol, pour que le harpon puisse se déclencher au-dessus de la grille d'appontage.

Ce principe est déjà envisagé pour l'appontage des UAV, nombre de navires étant équipés de grilles d'appontage OTAN :



Figure 4 : Harpon monté sous le camcopter SCHIEBEL

Enfin, il existe un quatrième système, marginal, qui fut choisi pour le drone démonstrateur allemand SEAMOS, à base d'électroaimants intégrés dans les pieds du train d'atterrissage de ce petit hélicoptère à pales contra-rotatives. Cependant, La défaillance de ce système en démonstration a mené à la fin de ce programme.

## 2.2. L'aérodynamique

Selon l'intensité et la direction du vent relatif par rapport à l'axe longitudinal au navire, l'aérodynamique du pont peut être plus ou moins perturbée autour du spot d'appontage. On distingue les perturbations stationnaires (écoulement établi avec gradients spatiaux de vitesses sur le pont), des perturbations instationnaires (turbulences, rafales).

Les perturbations sont les suivantes :

- vent rabattant vers le bas derrière la poupe du navire
- vent rabattant vers le bas derrière le toit du hangar hélicoptère
- zone de recirculation devant la porte du hangar
- Turbulences (instationnaires) autour du spot d'appontage

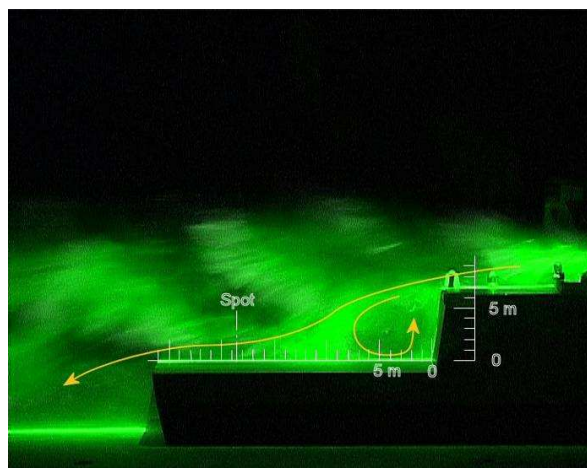


Figure 5 : Essai de soufflerie sur maquette de frégate

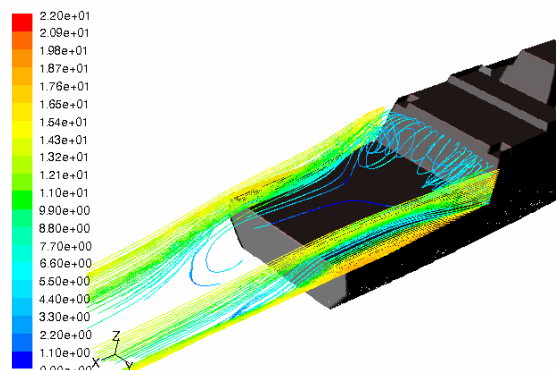


Figure 6 : Calcul d'écoulement derrière une frégate

Ces écoulements sont fortement perturbés par l'action des rotors d'un hélicoptère, et cette interaction hélicoptère/navire est difficile à modéliser, c'est pourquoi des vols en vrai grandeur sont nécessaires pour caractériser la stabilité du vol au-dessus d'un pont d'envol. Ces essais mènent alors à des polaires de vent relatif autorisés pour un certain type d'hélicoptère par navire (SHOL : Ship Helicopter Operations Limits).

- IV.11 -

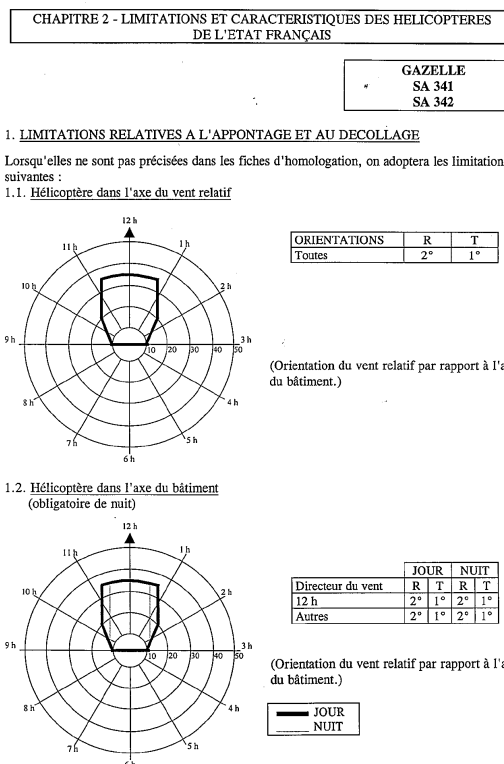


Figure 7 : Exemple de limitations d'appontage (SHOL) Gazelle

Par calcul, on peut estimer les excursions de l'UAV par rapport à un certain régime de vol, à l'aide d'un modèle numérique d'hélicoptère dronisé.

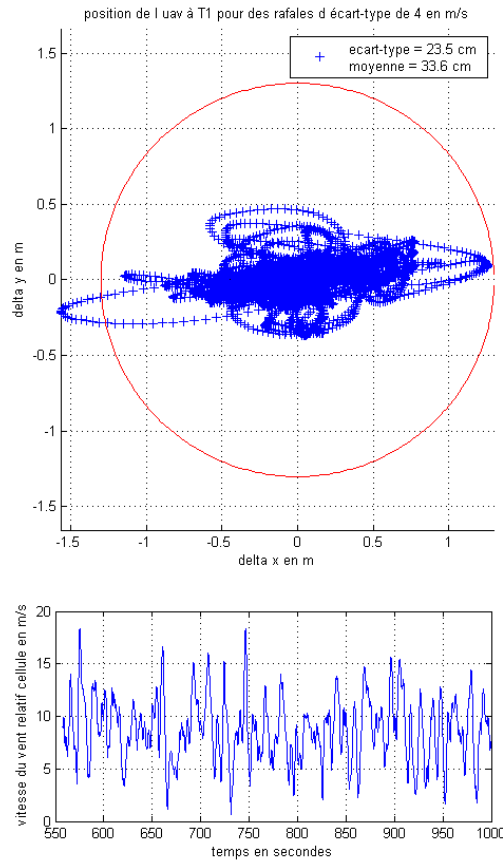


Figure 8 : Calcul de l'excursion du harpon sous l'effet de rafales de vent sur l'hélicoptère. Ceci permet d'observer des tendances de précision du vol par type d'hélicoptère.

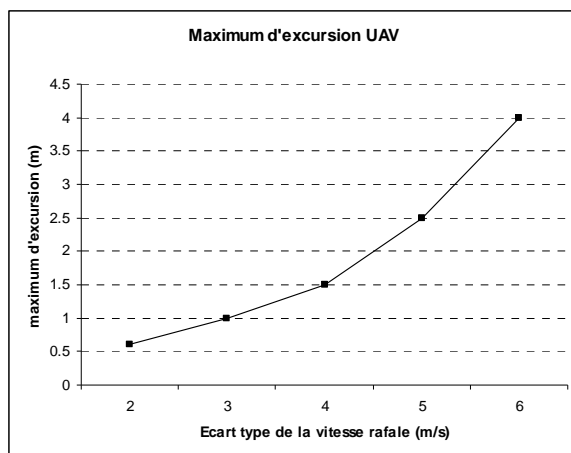


Figure 9 : Calcul de la tendance d'excursion de position en fonction de l'intensité des rafales de vent

### 2.3. Les mouvements de plateforme

Selon l'état de la mer, la direction de la houle par rapport à l'axe longitudinal navire et la vitesse du navire, les mouvements de translation (cavement, embardée, pilonnement) et de rotation (roulis, tangage, lacet) peuvent être forts.

Les translations horizontales de la grille joueront principalement sur la précision de posé.

La translation verticale de la grille jouera principalement sur le choc admissible sur le train d'atterrissage

Les rotations joueront sur les limites d'appontage. L'hélicoptère ayant une attitude donnée pour une certaine vitesse par rapport à l'air, l'attitude du pont doit être bornée à une certaine limite pour éviter le basculement ou le glissement de l'hélicoptère. Ces éléments (roulis et tangages maximum sont mentionnés au SHOL).

### 3. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT D'UN SYSTEME D'APPONTAGE AUTOMATIQUE

Le principe de fonctionnement d'un système d'appontage automatique, incluant des fonctions de guidage, repose sur l'axiome commandabilité/observabilité pour l'asservissement des systèmes dynamiques. Pour réaliser le contrôle de l'appontage il est nécessaire que l'état des véhicules (navire et drone) soit suffisamment observable, et que l'état des véhicules (principalement le drone) soit suffisamment commandable.

Il s'agit donc d'observer les mouvements du navire, avec la capacité de discriminer les mouvements court terme, du mouvement rectiligne uniforme (inertiel) du navire. Puis, selon l'estimation des états du drone et du navire, il s'agit de commander un état au drone. Cependant, comme le navire, en état de route aviation, n'est pas réellement commandable à court terme, il est nécessaire de prédire à court terme son mouvement de grille.

### 3.1. Estimation du mouvement moyen de la grille d'appontage

La trajectoire de la grille d'appontage dans un repère géographique NED (North East Down) est considérée, sans perte de généralités, comme la somme d'un mouvement rectiligne uniforme et de composantes harmoniques oscillantes. Les coordonnées du centre de la grille s'écrivent :

$$N_c(t) = \bar{V}_c^N * t + \tilde{N}_c(t)$$

$$\tilde{N}_c(t) = \sum_{i=0}^{Nh} n_i^s(t) \sin(i\omega t) + n_i^c(t) \cos(i\omega t) \quad (1)$$

$$E_c(t) = \bar{V}_c^E * t + \tilde{E}_c(t)$$

$$\tilde{E}_c(t) = \sum_{i=0}^{Nh} e_i^s(t) \sin(i\omega t) + e_i^c(t) \cos(i\omega t) \quad (2)$$

$$D_c(t) = \bar{V}_c^D * t + \tilde{D}_c(t)$$

$$\tilde{D}_c(t) = \sum_{i=0}^{Nh} d_i^s(t) \sin(i\omega t) + d_i^c(t) \cos(i\omega t) \quad (3)$$

Le repère grille moyenne est le repère attaché à la trajectoire rectiligne uniforme de la grille dans le NED.

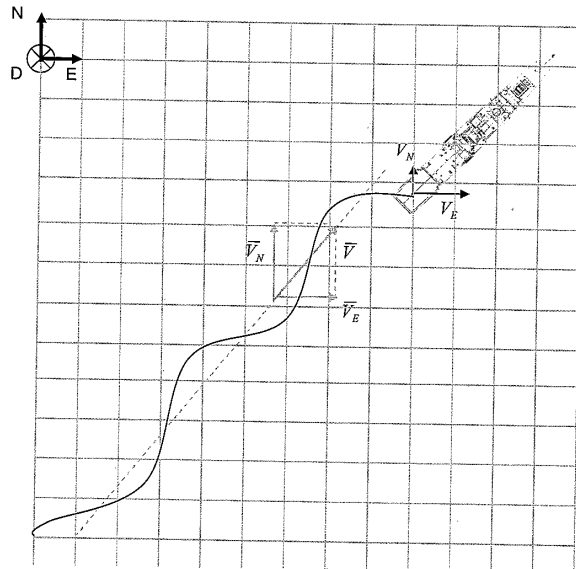


Figure 10 : Repère grille moyen

Il est possible de calculer ce repère moyen en intégrant une moyenne glissante des vitesses. Cependant, pour des questions d'initialisation du calcul, d'optimalité de l'estimation et de charge de calcul on utilise un filtrage de kalman convergé.

En considérant que le premier harmonique est le terme principal du bruit de modèle, on extrait le terme sinusoïdal de façon optimale en écrivant le modèle suivant :

$$X = \begin{bmatrix} N \\ \dot{N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_N^c t + n1.\sin(\omega t) \\ V_N^c + n1.\omega \cos(\omega t) \end{bmatrix}$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{N} \\ \ddot{N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_N^c + n1.\omega \cos(\omega t) \\ -n1.\omega^2 \sin(\omega t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} \omega & 0 \\ 0 & -\omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n1.\cos(\omega t) \\ n1.\sin(\omega t) \end{bmatrix}$$

L'estimation de l'état du modèle ainsi décrit est faite avec un kalman pour X valant la latitude N ou la longitude E :

$$\dot{\hat{X}} = A\hat{X} + Bu + L(y - C\hat{X})$$

$$\hat{X}^n = \hat{X}^{n-1} + \hat{X}^{n-1} Tc + L_1 Tc.(y - \hat{X}^{n-1}) \quad (5)$$

$$\hat{\dot{X}}^n = \hat{\dot{X}}^{n-1} + L_2 Tc.(y - \hat{X}^{n-1})$$

Cette technique a montré un découplage efficace des signaux à discriminer.

### 3.2. Estimation des mouvements court-terme de la grille d'appontage

L'estimation du mouvement court terme s'obtient en délocalisant les mesures d'une centrale inertielle hybridée à un GPS, à l'endroit du centre de la grille d'appontage (distance grille/centrale notée GC).

$$\begin{bmatrix} X_{grille} \\ Y_{grille} \\ Z_{grille} \end{bmatrix}_{NED} = \begin{bmatrix} X_{centrale} \\ Y_{centrale} \\ Z_{centrale} \end{bmatrix}_{NED} + P_{Navire \rightarrow NED} . GC_{Navire} \quad (6)$$

$$P_{Navire \rightarrow NED} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \cos \phi \sin \psi - \sin \phi \sin \theta \cos \psi & -\cos \phi \cos \psi - \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\sin \phi \cos \theta \\ -\sin \phi \sin \psi - \cos \phi \sin \theta \cos \psi & \sin \phi \cos \psi - \cos \phi \sin \theta \sin \psi & -\cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

Puis, en ôtant le mouvement inertiel issu de (5) à cette position instantanée, on obtient le mouvement court terme :

$$X_{grille-CT}^n = X_{grille}^n - \hat{X}^n \quad (8)$$

Exprimée ainsi, le centre de la grille d'appontage décrit une sorte d'ellipse dans son repère moyen (attaché au mouvement moyen décrit au §2.1), voir figure 11.



### 3.3. Prédiction des mouvements court terme de la grille d'appontage

La prédiction à court terme des mouvements de la plateforme est une prédiction suffisamment précise pour détecter la présence de la grille sur un horizon de quelques secondes nécessaires à la descente. Il faut être précis au rayon de la grille près sur environ 5 secondes.

On utilise pour cela la méthode autorégressive de Yule Walker décrite dans Box Jenkins [1], (chaîne de Markov classiquement utilisée en acoustique et en finance).

En notant la fonction d'autocorrélation du signal court terme du mouvement de grille :

$$\rho(i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-i} y(k+i)y(k) \quad (9)$$

On forme la matrice d'autocorrélation suivante

$$\begin{pmatrix} -\rho(1) \\ -\rho(2) \\ \dots \\ -\rho(p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho(0) & \rho(1) & \dots & \rho(p-1) \\ \rho(1) & \rho(0) & \dots & \rho(p-2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho(p-1) & \dots & \dots & \rho(0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_p \end{pmatrix} \quad (10)$$

Et la prédiction du signal se fait récursivement avec les coefficients  $a_n$  :

$$\hat{y}(n+1) = -a_1 y(n) - a_2 y(n-1) - \dots - a_p y(n-(p-1)) \quad (11)$$

L'estimation des coefficients du filtre ( $a_n$ ) est obtenue par inversion de la matrice d'autocorrélation décrite ci-dessus. L'estimation des coefficients se fait à chaque pas de temps d'une nouvelle mesure de géolocalisation grille, ce qui permet une prédiction permanente de son centre.

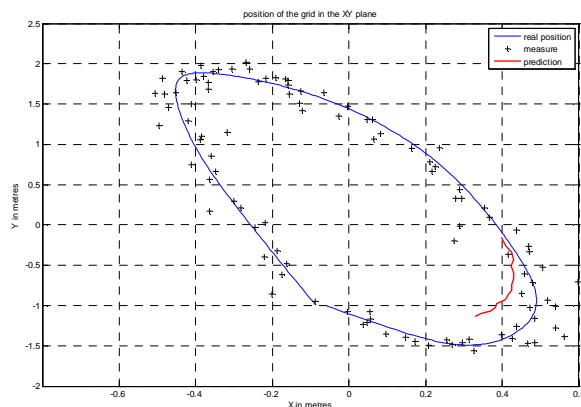


Figure 11 : Prédiction à 5s sur des mesures bruitées dans le plan XY

La performance de prédiction est estimée avec des techniques statistiques : plus longue est la période d'observation, meilleure est la prédiction.

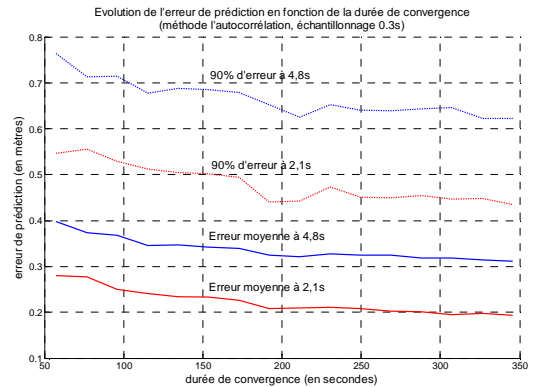


Figure 12 : Erreur de prédiction de la méthode d'autocorrélation

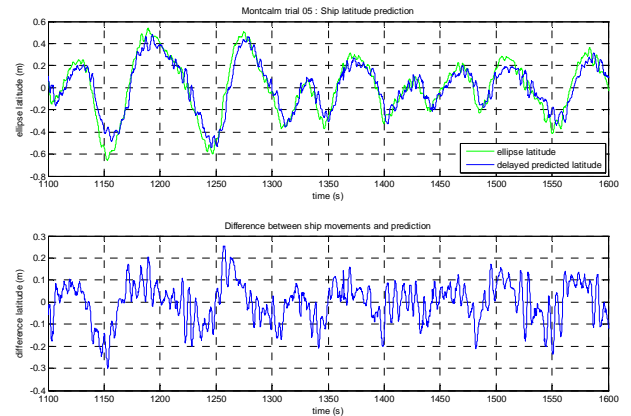


Figure 13 : Prédiction des mouvements sur une frégate en navigation

### 3.4. Observation de l'état du drone : capteur d'appontage

Le drone natif, habituellement mis au point pour des applications terrestres, a son propre système de navigation, qui permet de le géolocaliser avec une précision de type GPS, et de connaître sa vitesse, son attitude (roulis, tangage, cap).

Cependant la connaissance de cet état n'est pas suffisant pour réaliser l'asservissement de la position du drone relativement à la grille d'appontage. Il est nécessaire d'observer précisément l'écartométrie entre un point du fuselage du drone (idéalement le bout du harpon) et le centre de la grille d'appontage.

Pour ce faire DCNS a mis au point un système optique infrarouge permettant de faire une mesure précise de 10cm jusqu'à une distance

d'environ 50m [4] ; le manque de visibilité (météo) à 50m est en effet très rare.



Figure 14 : Implantation des cibles IR autour du fuselage d'un camcopter



Figure 15 : Implantation de la caméra IR sur le toit du hangar hélicoptère



Figure 16 : Acquisition du groupe de cibles IR par la caméra IR



Figure 17 : Image IR du drone au-dessus du pont d'envol, image optimisée en terme de SNR.

Comme le montrent les figures suivantes, le volume d'acquisition du capteur d'appontage est dimensionné pour être compatible du volume de vol prévu autour du pont d'envol.

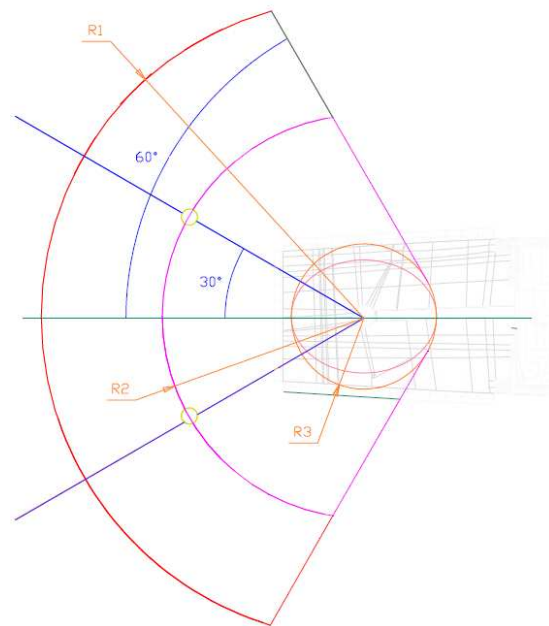


Figure 18 Secteur d'acquisition du capteur d'appontage