



FLARE

Projet de fin d'étude

Maître de stage : Frédéric Dehais
Responsable école : Christian Colongo
Auteur : Williams Grac
Avancement : 15 septembre 2005



Table des matières

1. FLARE : version de développement

1.1. Principe

1.2. Mise en oeuvre sur le simulateur

1.3. Essais

1.4. Retour d'expérience

2. FLARE : version de démonstration

2.1 Stabilité vis à vis du « pompage » au manche

2.2 Atterrissage au pilote automatique

2.3 Atterrissage en conditions turbulentes



Présentation

Aujourd'hui encore, la fréquence d'apparition des atterrissages durs (Hard Landing) reste suffisamment élevée pour constituer une préoccupation dans le monde aéronautique. Or, si de nombreux systèmes permettent d'assister le pilote dans la quasi-totalité des phases de vol, il n'existe aucune aide efficace pour le guider au cours de l'arrondi (Flare). Aussi, le Centre aéronautique et spatial de SUPAERO (CAS) a décidé, avec le concours d'un pilote d'essais d'Airbus, de se lancer dans la recherche d'une solution.

Le système FLARE développé et expérimenté par Williams Grac constitue l'aboutissement de ces travaux.

Il s'agit d'un système qui, durant l'arrondi, indique au pilote la valeur prédictive de la pente au moment de l'atterrissage en fonction de son action sur les commandes (manche, palonnier et manette des gaz). Un algorithme de calcul effectue, toutes les 20 millisecondes, une simulation numérique de la trajectoire en supposant la position du manche constante. La valeur de la pente à l'atterrissage ainsi obtenue est ensuite filtrée par un filtre du premier ordre de constante de temps paramétrable. Ce traitement permet d'obtenir une information stable et naturellement pilotable. D'un point de vue ergonomique, cette information est présentée sous deux modalités.

1. Modalité visuelle : un vecteur prédictif est affiché dans le HUD à la place du vecteur trajectoire au moment de l'arrondi. Ce principe présente l'avantage de donner une information cohérente avec la situation sans surcharger l'IHM.

2. Modalité auditive : un signal sonore modulé en fréquence et corrélé avec le vecteur prédictif est émis dans le cockpit.

Ce système est opérationnel sur le simulateur de vol du CAS et fait actuellement l'objet d'expérimentations par un nombre important de pilotes : pilotes d'essais d'Airbus, pilotes militaires et privés. Il doit permettre, à terme, de faciliter l'arrondi et d'accroître la sécurité aérienne.



Chapitre 1

FLARE : version de développement

Le vecteur prédictif élaboré par simulation numérique constitue l'essentiel du projet FLARE. Par construction, l'algorithme de calcul développé calcule avec exactitude une pente prédictive à l'atterrissage fonction directe de l'ordre aux commandes. Cependant, la solution n'est pas immédiate. L'information de pente brute doit être traitée et présentée sous forme d'une symbologie ergonomique et naturellement pilotable.

Cette section présente l'évaluation par une population de pilotes de la première version du vecteur FLARE issu de la simulation numérique.

La version de démonstration ultérieure qui intègre de nouvelles fonctionnalités et les modifications suggérées par le retour d'expérience, fait l'objet de la section suivante.

1.1 Principe

Le principe consiste à faire exécuter toutes les 20 millisecondes, au simulateur, une simulation numérique de la trajectoire en supposant constant l'ordre aux commandes (manche, palonnier et manette des gaz). Pour ce faire, on a développé et codé sur un des PC utilisé par le simulateur une fonction appelée *flare* (). Cette fonction réalise une boucle de calcul répétée jusqu'à ce que la trajectoire commandes figées intercepte le sol ou jusqu'à ce que la pente de cette trajectoire soit nulle. À chaque début de cycle elle est initialisée avec les paramètres de l'instant de l'avion : altitude, vitesses, incidences aérodynamiques, positions des commandes, etc.

1.2 Mise en oeuvre sur le simulateur

Codage

La boucle de calcul prédictive, réalisée par la fonction *flare* (), utilise rigoureusement le même algorithme de calcul que le simulateur pour déterminer l'ensemble des paramètres au pas de calcul suivant. Lorsque la boucle s'arrête (hauteur nulle ou pente nulle) on peut récupérer tous les paramètres de la trajectoire simulée en fin de boucle. Le pas de calcul de la boucle (ΔT_{simu}) est paramétrable. Son choix résulte d'un compromis entre la précision recherchée et le temps de calcul nécessaire. Sur les PC du CAS il est possible de le fixer à 0.5 secondes sans ralentir le système et avec une excellente précision.



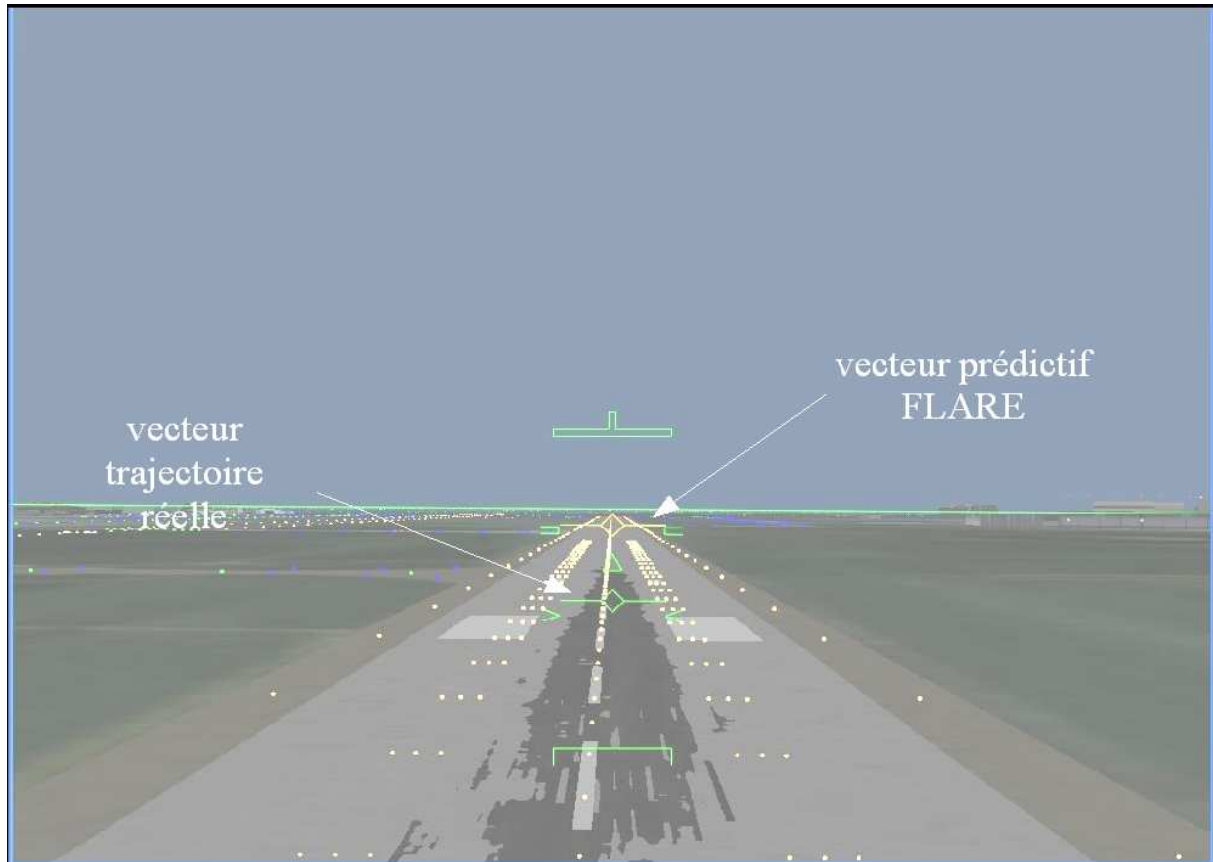


Fig. 1.1 – visualisation expérimentale

Afin de disposer d'une information stable et non bruitée, un filtre du premier ordre de constante de temps τ , construit avec un algorithme de Bashford, élabore la valeur *varFlare 2* à partir d'une consigne. Cette consigne est soit la pente prédictive à l'atterrissage, soit la hauteur prédictive multipliée par un coefficient de proportionnalité pour respecter une homogénéité dans l'échelle du HUD (l'échelle verticale du HUD est une échelle de pente en degrés).

Symbologie

La figure 1.1 montre la nouvelle symbologie du HUD. Sur la même verticale que le traditionnel vecteur trajectoire de couleur verte, se trouve le vecteur prédictif FLARE qui adopte la même géométrie mais qui est présenté en jaune. À des fins expérimentales le vecteur FLARE est affiché de façon permanente et lorsqu'il se confond avec le vecteur trajectoire, la couleur jaune est dominante. Au terme de l'expérimentation, il n'apparaîtra qu'en deçà d'une hauteur à définir (passage en mode FLARE) pour ne pas interférer avec la phase d'approche et prévenir de l'imminence de l'arrondi. La logique de fonctionnement relative au vecteur FLARE est la suivante :



- lorsque l'avion est en montée, le vecteur FLARE indique la pente réelle, les deux vecteurs sont confondus et le jaune domine ;
- lorsque l'avion est en descente et que l'ordre aux commandes est trop important, le vecteur FLARE prédit, dans l'échelle de pente du HUD, la hauteur du point le plus bas de l'arrondi multipliée par un coefficient de 13 pour des raisons d'homogénéité d'échelle ;
- lorsque l'avion est en descente et que *l'ordre aux commandes* conduit l'avion au sol, le vecteur FLARE prédit la pente à l'atterrissage.

En complément, le pilote dispose d'une information auditive directement corrélée au vecteur FLARE. Ce signal auditif présente deux avantages : il renforce le traitement de l'information visuelle et peut également être utilisé sur les avions dépourvus de HUD. Dans le contexte expérimental, le signal auditif est émis de façon permanente pour permettre au pilote de se familiariser avec les différentes tonalités. Par la suite, il ne sera émis qu'en mode FLARE. La logique de fonctionnement relative au signal auditif est la suivante :

- un bip aigu, modulé en fréquence de répétition et en tonalité est émis lorsque la pente à l'atterrissage est trop forte en valeur absolue (vecteur FLARE $< -1^\circ$). Plus l'atterrissage risque d'être dur, plus les fréquences et le volume augmentent : le bip est plus aigu et plus rapide ;
- un son continu grave, modulé en tonalité est émis lorsque le pilote arrondit trop (vecteur FLARE $> -0.5^\circ$). Le son est d'autant plus grave et le volume d'autant plus important que l'arrondi est haut ;
- le son est coupé lorsque le vecteur FLARE est dans une fourchette de plus ou moins 0.25° par rapport à la pente optimale à l'atterrissage fixée à -0.75° ou lorsque l'avion est en contact avec le sol.

1.3 Essais

La figure 1.2 et la figure 1.3 illustrent clairement les 4 qualités du vecteur FLARE :

1. la précision de la prédiction de la pente à l'atterrissage : à une position du manche donnée correspond une pente prédictive que rejoint la pente réelle au moment de l'impact ;
2. la corrélation avec l'ordre aux commandes : à un ordre aux commandes donné (-0.28 dans l'exemple) correspond une prédiction de pente à l'atterrissage (-0.75° dans l'exemple) ;
3. la stabilité obtenue par filtrage de l'information brute : le vecteur FLARE évolue avec fluidité ;
4. la réactivité : le vecteur FLARE « décolle » dès l'action au manche.



En théorie linéarisée, en ce qui concerne l'assiette, l'avion se comporte comme un système du second ordre bien amorti (la norme impose $\xi > 0.4$) proche d'un système du premier ordre.

Le vecteur FLARE est élaboré par un filtre passe bas du premier ordre dont le temps de réponse dépend d'une constante de temps réglable. Ce qui lui confère une propriété essentielle : sa dynamique est paramétrable. Il est possible, en prenant une constante de temps proche de celle de l'avion, de le doter de la même dynamique que l'assiette de l'avion naturel. On gagne en confort et en sensation de pilotage ce que l'on perd en réactivité.

Dans la version expérimentale, la constante de temps est fixée a priori à 0.5 secondes pour juger au mieux de la précision et de la réactivité du système, mais sa valeur finale dépendra des appréciations des pilotes.

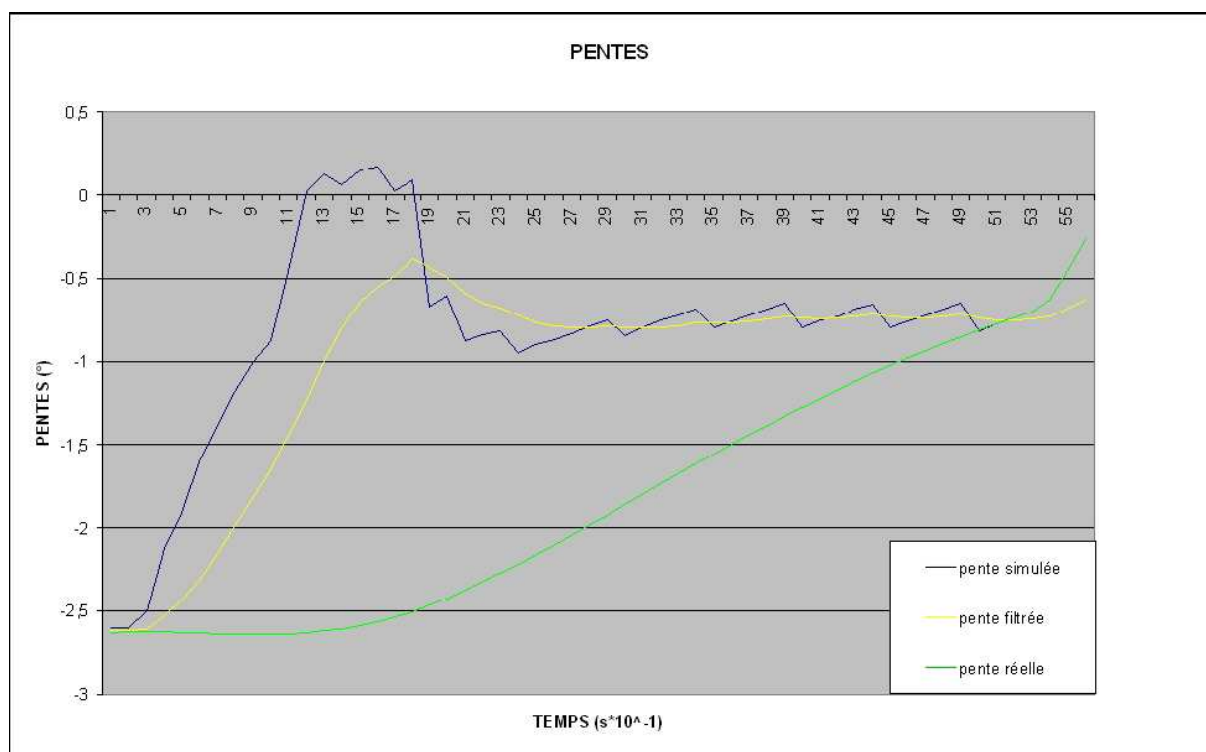


Fig. 1.2 – pentes durant l'arrondi en fonction du temps



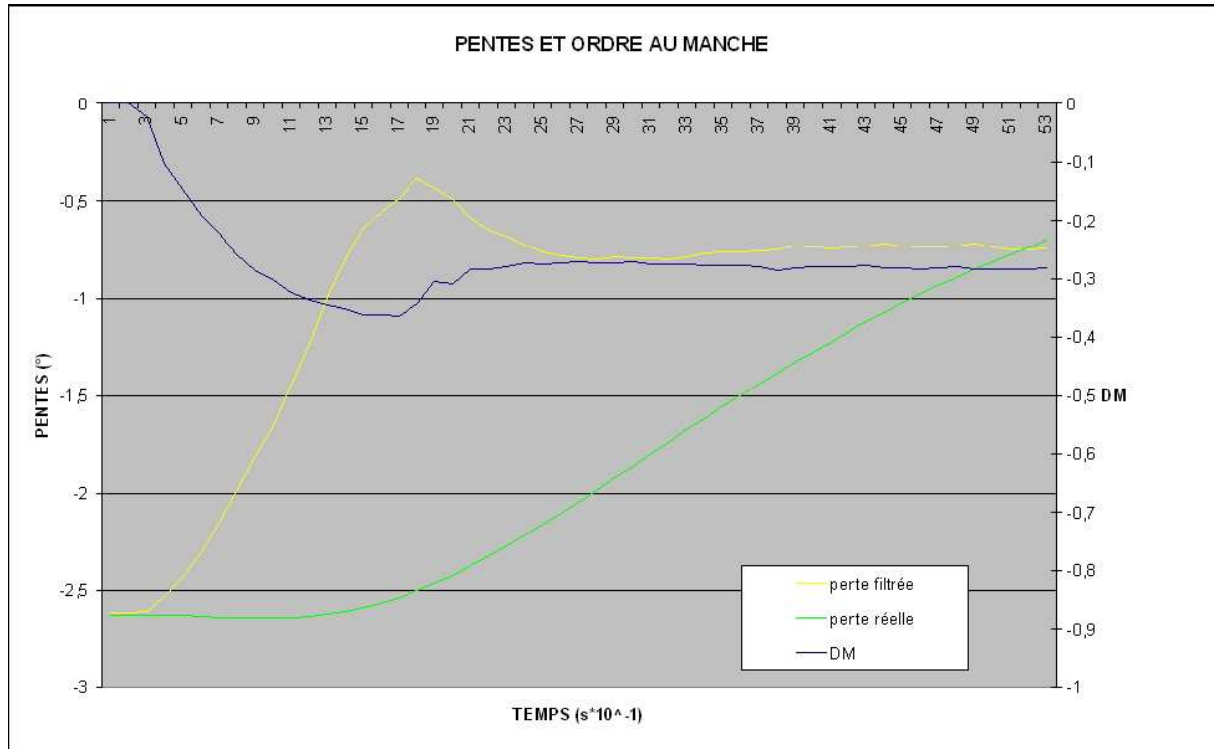


Fig. 1.3 – pentes et ordre aux commandes durant l’arrondi en fonction du temps

Le système permet donc un réglage fin. En outre, il offre au pilote la possibilité d’adapter sa gestion du vol au contexte opérationnel. Il peut, dans le cadre d’un atterrissage court, privilégier une pente forte ou une pente moindre sur une bonne piste lorsque l’avion est lourdement chargé. Cette souplesse d’emploi est fondamentale pour les avions tactiques.

1.4 Retour d’expérience

La version expérimentale a été testée par des pilotes privés, un pilote militaire et un pilote d’essais. Elle a pour but de mettre au point un démonstrateur permettant des expérimentations plus structurées avec une plus grande population de pilotes d’origines diverses (militaires, essais, civils) : mise en situation dans différents scénarios avec analyse de la performance objective et subjective.

L’évolution vers le démonstrateur s’est opérée sur la base des relevés de paramètres et des appréciations des sujets sur la version expérimentale.

Ces appréciations et les modifications (lorsqu’elles sont possibles) qui en découlent sont exposées dans les paragraphes suivants.



Sensibilité et dynamique

De l'avis général des sujets, et les relevés de paramètres le confirment, le vecteur FLARE se montre stable et précis. Cependant, une partie des sujets a éprouvé des difficultés de pilotage liées à la sensibilité au manche et à la dynamique du vecteur.

La sensibilité du manche du simulateur est un problème que l'on ne peut régler sans modifications majeures. Le pilotage du vecteur FLARE, comme celui du simulateur, est délicat et cela interfère avec la qualité des expérimentations. Le problème demeure et il sera important de faire la part des choses dans l'évaluation finale du démonstrateur.

Avec une constante de temps de 0.5 secondes, le vecteur prédictif possède une dynamique élevée qui peut être déroutante au passage en mode FLARE. Il réagit dès l'action sur le manche et monte très rapidement vers sa valeur prédictive. Ceci constitue un changement brutal dans les sensations de pilotage. Aussi, pour garder la continuité entre la dynamique de la symbologie et la réponse de l'avion, *la constante de temps du vecteur FLARE est prise égale à la constante de temps de tangage de l'avion naturel (1.2 seconde)*.

Ainsi, comme le montre la figure 1.4, pour une action donnée sur le manche, vecteur et assiette évoluent à la même vitesse. Le caractère prédictif du système s'en trouve un peu affecté mais il demeure encore largement suffisant : l'information de pente prédictive se stabilise en 1.5 secondes. On élimine par la même occasion les informations d'*over flare* qui apparaissaient parfois en début d'arrondi (action au manche trop importante ou arrondi débuté trop haut).

Symbologie

Avec une constante de temps de 1.2 secondes, le vecteur prédictif possède une dynamique identique à celle de l'avion. D'autre part, étant donné qu'il donne au moment de l'atterrissage la valeur réelle de la pente, le vecteur trajectoire peut disparaître dès le passage en mode FLARE. À 50 pieds, le vecteur passe de la couleur verte à la couleur jaune et devient prédictif. Ce changement de mode se fait sans discontinuité de l'information. On évite ainsi de surcharger le HUD d'informations et le pilote poursuit la gestion de sa trajectoire à l'aide du même symbole.



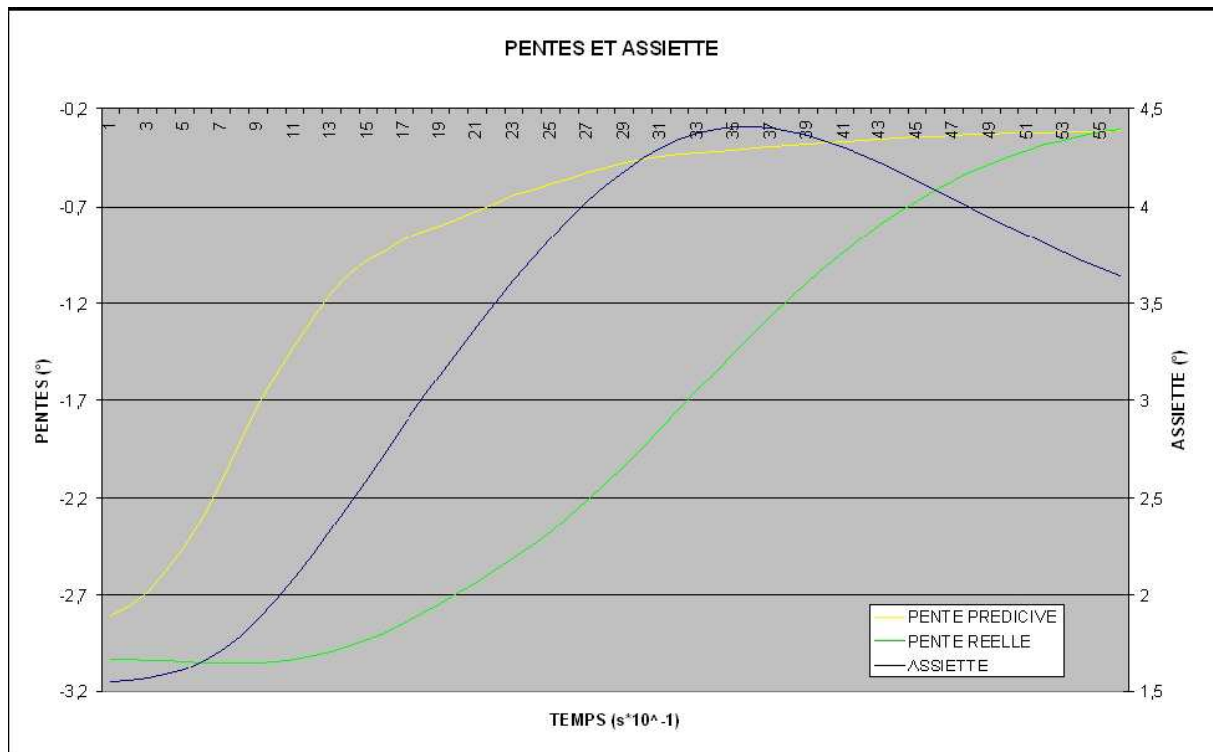


Fig. 1.4 – dynamiques comparées du vecteur FLARE et de l’assiette durant l’arrondi

Signal sonore

Le signal sonore a donné satisfaction. Il a été jugé très appréciable. Cependant, la fourchette de pente optimale à l’atterrissage à l’intérieur de laquelle aucun son n’est émis (-0.75° plus ou moins 0.25°) a été perçue comme trop étroite.

Désormais, *pour des valeurs de pente à l’atterrissage comprises entre -1° et 0° aucun signal sonore ne sera émis.*

Amélioration du réalisme

Certains sujets ont estimé que, sans prise en compte de l’effet de sol, le modèle n’était pas suffisamment réaliste pour retrouver les sensations du vol et donc porter un jugement sur le système. Pour affiner le réalisme du démonstrateur, *l’effet de sol est modélisé sur le simulateur.* Il est pris en compte dans la boucle prédictive. Le modèle utilisé est fourni en annexe.

Autre modification souhaitée par les pilotes d’Airbus, *une voix synthétique effectue le décompte de la hauteur du radio altimètre* comme cela existe sur les avions de la famille Airbus.



Conclusion du premier chapitre

Objectivement, le système répond bien au besoin : la prédiction est excellente et entièrement corrélée avec la position du manche. Cependant dans sa version expérimentale, le système présente une dynamique assez éloignée de celle de l'avion et le pilotage en mode FLARE est différent de celui de l'avion en approche ce qui, a perturbé un nombre significatif de pilotes. En modifiant les paramètres du système on a obtenu une information plus ergonomique, d'une dynamique identique à celle de l'avion, qui se pilote naturellement tout en conservant son caractère prédictif.

Avec ces réglages le système est dans une version dite *démonstrateur* dont l'expérimentation fait l'objet de la section suivante.



Chapitre 2

FLARE : version de démonstration

2.1 Stabilité vis à vis du « pompage » au manche

Afin de tester la stabilité du vecteur prédictif pour de rapides mouvements de manche autour d'une position moyenne, on a volontairement pratiqué du « pompage » à la profondeur au cours de l'arrondi.

La figure 2.1 montre que le vecteur prédictif conserve une position stable, à l'identique de l'avion dont l'attitude est peu affectée par des oscillations hautes fréquences de la gouverne de profondeur.

Dans cette situation, le vecteur prédictif conserve un comportement et une dynamique très proches de ceux de l'avion.

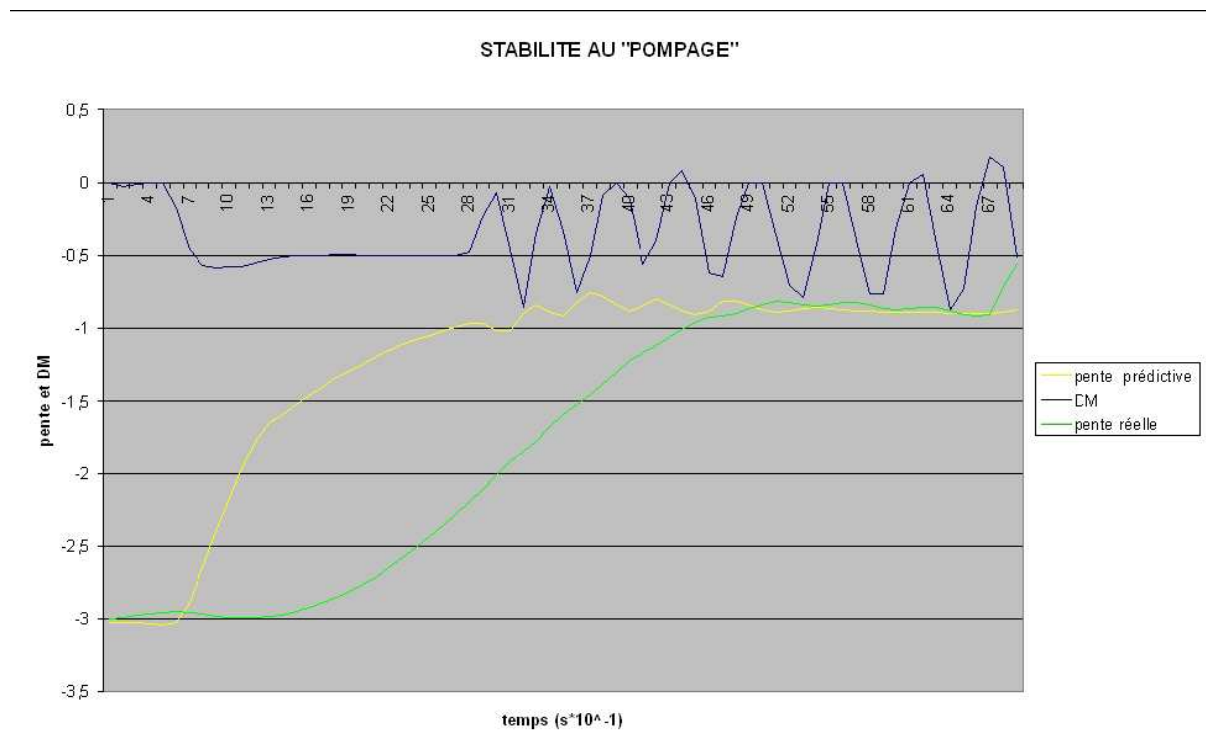


Fig. 2.1 – stabilité du vecteur vis à vis du « pompage » au manche



2.2 Atterrissage au pilote automatique

Dans le cadre du projet GHOST un pilote automatique a été intégré au simulateur. La figure 2.2 et la figure 2.3 montrent les résultats obtenus lors d'un atterrissage automatique pour lequel la pente de consigne à l'impact est de $-0,75^\circ$.

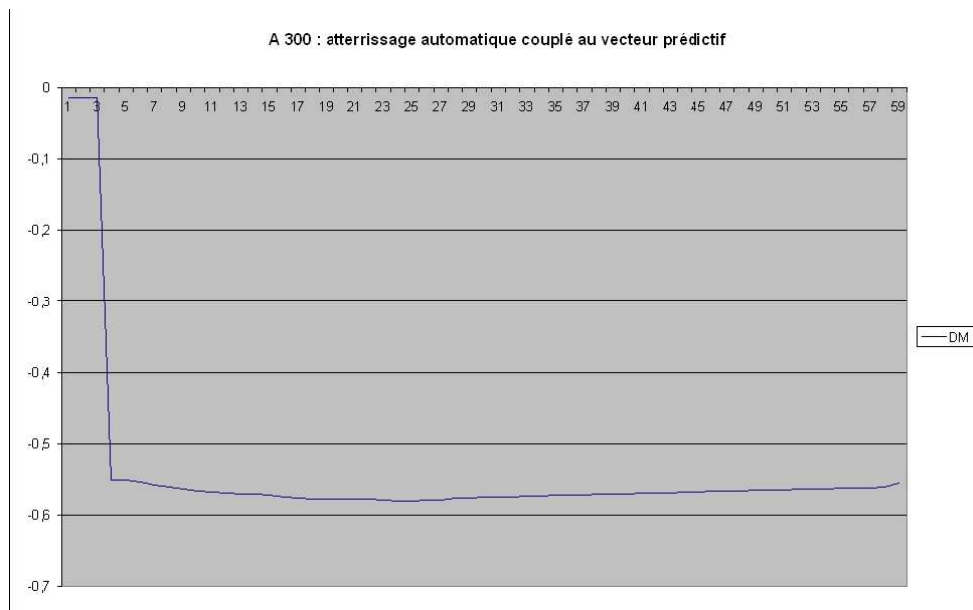


Fig. 2.2 – position de la gouverne de profondeur en atterrissage automatique

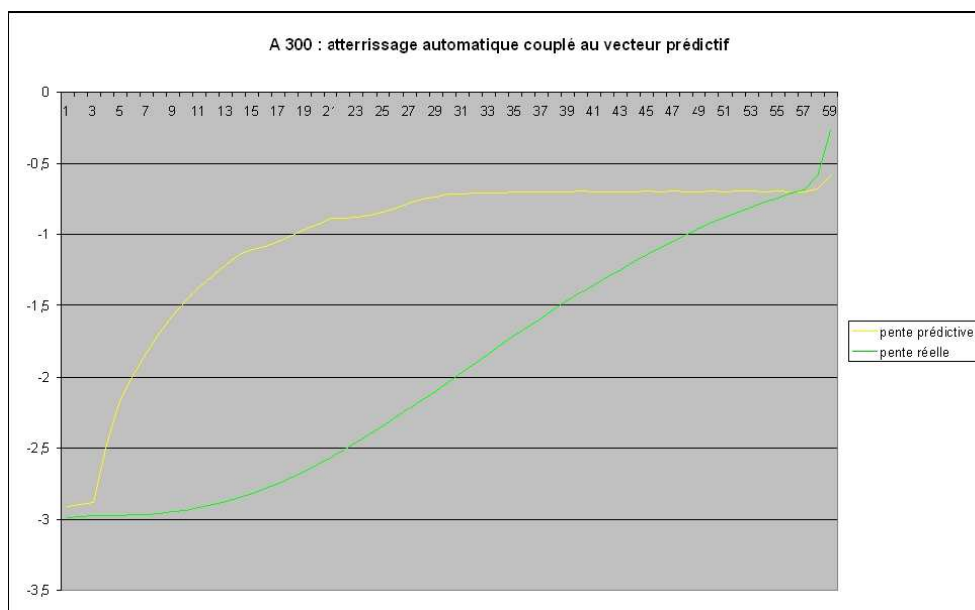


Fig. 2.3 – pentes au cours de l'arrondi en atterrissage automatique



Lors des atterrissages au pilote automatique sur les avions de la gamme Airbus, l'avion est asservi à une trajectoire sol. Cet asservissement génère des oscillations de la gouverne de profondeur de très haute fréquence. Une telle loi de pilotage ne peut être suivie par un pilote humain et entraîne une fatigue structurale importante de la gouverne.

L'avantage d'un asservissement au vecteur prédictif est d'obtenir une commande en échelon stable, plus robuste vis à vis des aléas météorologiques et qui diminue la fatigue structurale de la gouverne.

2.3 Atterrissage en conditions turbulentes

Des essais d'atterrissage en conditions turbulentes ont été réalisés afin de déterminer dans quelle mesure le vecteur prédictif reste pilotable. Pour permettre d'apprécier le niveau de la turbulence simulée, la figure 2.4 montre l'intensité de rafales suivant les trois directions.

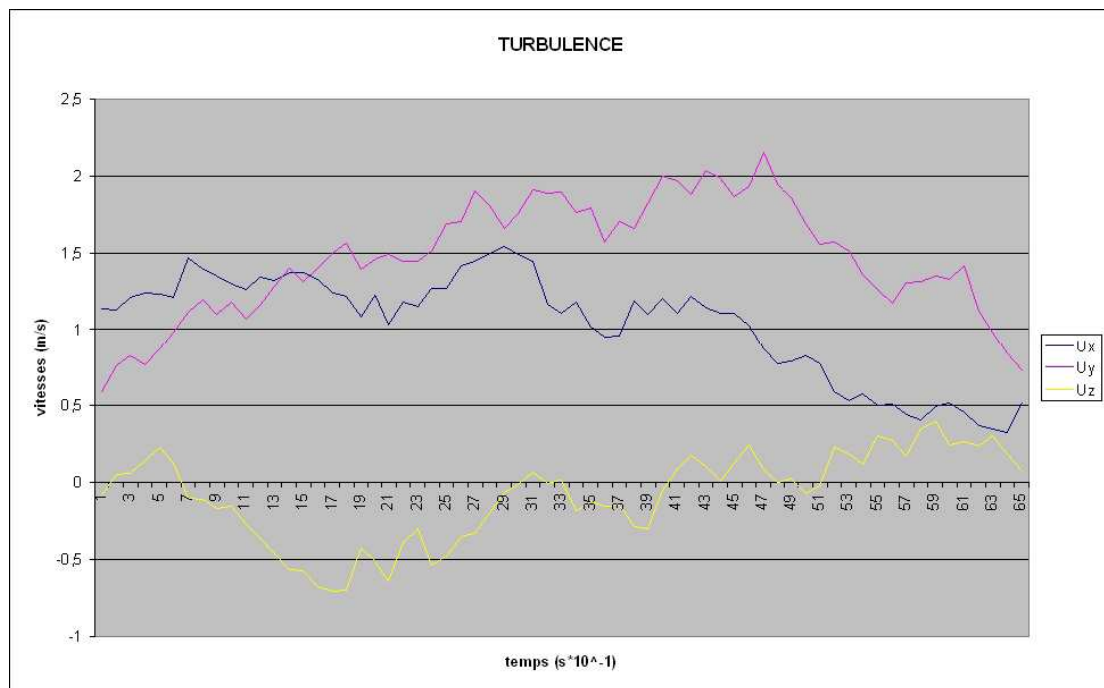


Fig. 2.4 – vitesses des rafales de vent en atmosphère turbulente



Sur la figure 2.5 on voit que pente prédictive et pente réelle sont affectées de façon similaire par la turbulence. On constate de plus que le vecteur prédictif est stable. En pratique, il se pilote aisément avec un niveau de bruit équivalent à celui ressenti dans l'avion.

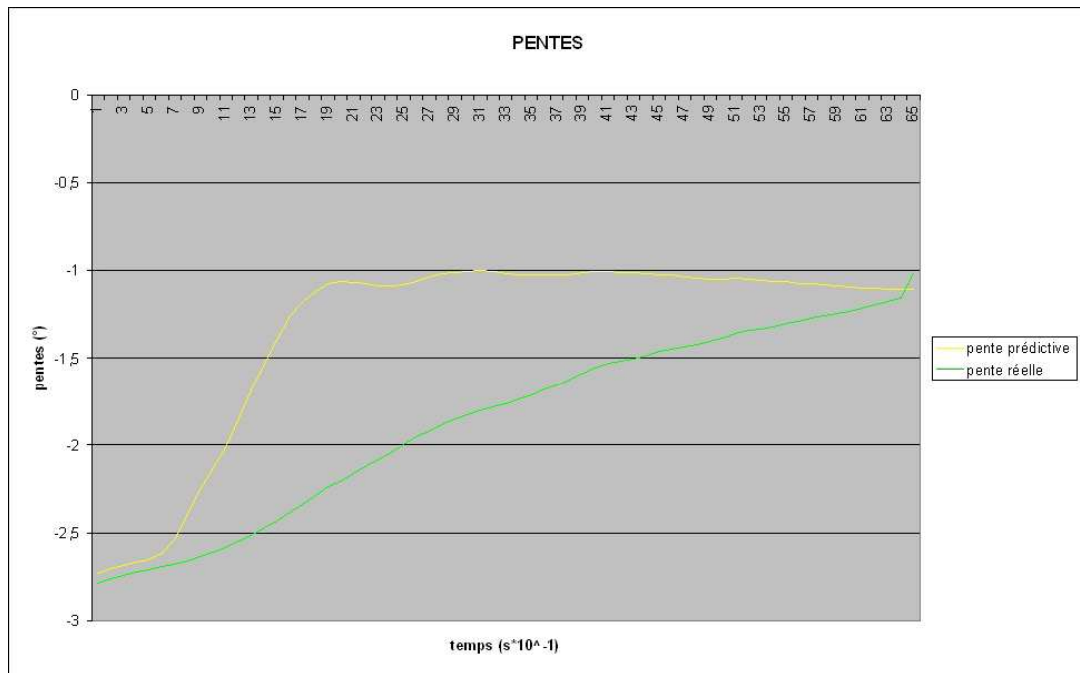


Fig. 2.5 – pentes au cours de l'arrondi en atmosphère turbulente