



HAL
open science

Visualiser les affordances : la clef pour l'appontage d'hélicoptère ?

Mathieu Thomas

► **To cite this version:**

Mathieu Thomas. Visualiser les affordances : la clef pour l'appontage d'hélicoptère?. Sciences de l'ingénieur [physics]. Aix Marseille Université, 2023. Français. NNT : 2023AIXM0001 . tel-04726144

HAL Id: tel-04726144

<https://theses.hal.science/tel-04726144v1>

Submitted on 8 Oct 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

THÈSE DE DOCTORAT

Soutenue à Aix-Marseille Université
le 5 octobre 2023 par

Mathieu THOMAS

Visualiser les affordances : la clef pour l'appontage
d'hélicoptère ?

Discipline

Sciences du Mouvement Humain

École doctorale

ED 463 SCIENCES DU MOUVEMENT HUMAIN

Laboratoire/Partenaires de recherche

Office National d'Etudes et Recherches
Aérospatiales (ONERA)
Direction générale de l'armement (DGA)
Agence Innovation Défense (AID)

Composition du jury

Isabelle SIEGLER Prof, université Paris-Saclay	Rapporteure Présidente du jury
Anne-Hélène OLIVIER Dr, université Rennes 2	Rapporteure
Clark BORST Prof, T.U. Delft	Examineur
Ludovic SEIFERT Prof, Rouen Normandie Uni- versité	Examineur
Franck RUFFIER DR CNRS, Aix-Marseille Uni- versité	Directeur de thèse
Antoine MORICE Dr, Aix-Marseille université	Co-directeur de thèse
Thomas RAKOTOMAMONJY Dr, ONERA	Membre invité
Brice ISABLEU Prof, Aix-Marseille université	Membre invité

Affidavit

Je soussigné, Mathieu Thomas, déclare par la présente que le travail présenté dans ce manuscrit est mon propre travail, réalisé sous la direction scientifique de Franck Ruffier et Antoine Morice, dans le respect des principes d'honnêteté, d'intégrité et de responsabilité inhérents à la mission de recherche. Les travaux de recherche et la rédaction de ce manuscrit ont été réalisés dans le respect à la fois de la charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et de la charte d'Aix-Marseille Université relative à la lutte contre le plagiat.

Ce travail n'a pas été précédemment soumis en France ou à l'étranger dans une version identique ou similaire à un organisme examinateur.

Fait à Salon-de-Provence le 21 avril 2023



Cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la [Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Liste de publications et participations aux conférences

Liste des publications et/ou brevets réalisées dans le cadre du projet de thèse :

1. Mathieu THOMAS, José M. Pereira FIGUEIRA, Julien R. SERRES et al. « Helicopter Pilots Synchronize Their Altitude with Ship Heave to Minimize Energy When Landing on a Ship's Deck ». In : *The International Journal of Aerospace Psychology* 31.2 (2021). Publisher : Routledge _eprint : <https://doi.org/10.1080/24721840.2020.1862659>, p. 135-148. DOI : [10.1080/24721840.2020.1862659](https://doi.org/10.1080/24721840.2020.1862659). URL : <https://doi.org/10.1080/24721840.2020.1862659>
2. Mathieu THOMAS, Julien R SERRES, Thomas RAKOTOMAMONJY et al. « Visual augmentation of deck-landing-ability improves helicopter ship landing decisions ». In : *Scientific Reports* 13.1 (2023), p. 5119

Participations aux conférences et écoles d'été au cours de la période de thèse :

1. Mathieu THOMAS, Julien R SERRES, Thomas RAKOTOMAMONJY et al. « On the functional nature of perceptual-motor coupling during ship deck landing maneuvers. » Journées FIG.RV, Marseille. 2019. URL : <https://jfigrv2019.sciencesconf.org/index.html>
2. James A. DIXON, Dilip KONDEPUDI, Franck TILL et al. « Self-Organization for Behavioral Scientists Workshop. » Center for the Ecological Study of Perception & Action (CESPA), UCON, USA. 2019. URL : <https://cespa.uconn.edu/selforgsummer2019/>
3. Mathieu THOMAS, Julien R SERRES, Thomas RAKOTOMAMONJY et al. « Benefits of ecologically designed visual interfaces for the perception of deck landing opportunities with helicopter. » Journées GTRV, Online. 2021. URL : <https://www.afxr.org/articles/69163-journee-gtrv-realites-virtuelles-19-mars-2021>
4. Julien R SERRES, Mathieu THOMAS, Aimie BERGER DAUXÈRE et al. « Are biological agents governed by similar visuo-motor mechanisms to fly? » International Conference on Perception and Action (ICPA), Guadalajara. 2023. URL : <https://icpa2023.com/>

Visualiser les affordances : la clef pour l'appontage d'hélicoptère ?

Directeur : Docteur Franck Ruffier (DR CNRS à Aix-Marseille Université)

Co-directeur : Docteur Antoine Morice (Aix-Marseille Université)

Co-encadrant : Docteur Thomas Rakotomamonjy (ONERA)

Rapportrices : Docteure Anne-Hélène Olivier (Université Rennes 2)

Professeure Isabelle Siegler (Université Paris-Saclay)

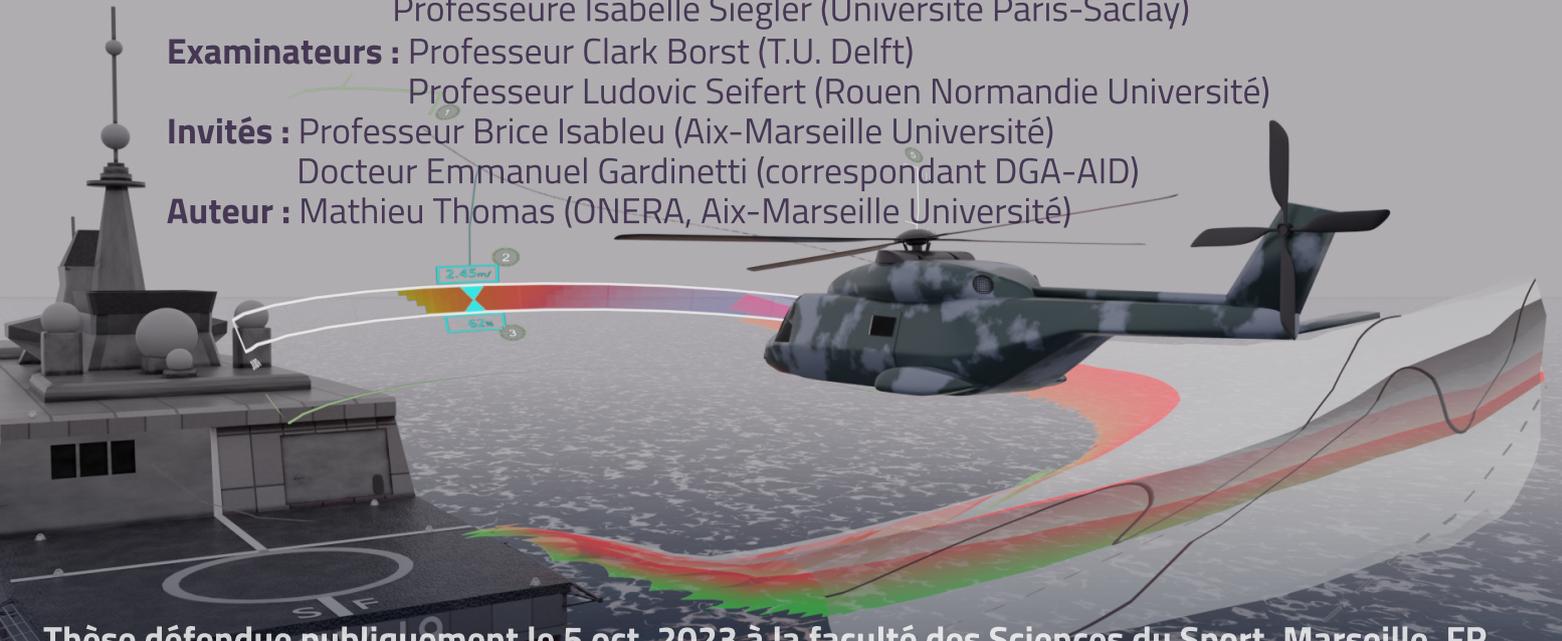
Examineurs : Professeur Clark Borst (T.U. Delft)

Professeur Ludovic Seifert (Rouen Normandie Université)

Invités : Professeur Brice Isableu (Aix-Marseille Université)

Docteur Emmanuel Gardinetti (correspondant DGA-AID)

Auteur : Mathieu Thomas (ONERA, Aix-Marseille Université)



Thèse défendue publiquement le 5 oct. 2023 à la faculté des Sciences du Sport, Marseille, FR

Résumé :

La sécurité des atterrissages d'hélicoptères sur des navires (i.e., un appontage) nécessite une interface adéquate afin de prévenir les accidents associés aux limitations perceptives des pilotes. Dans cette thèse, une interface visuelle en réalité virtuelle a été conçue et testée pour améliorer la sécurité et la performance des pilotes. L'approche novatrice repose sur la modélisation des affordances. Cette modélisation permet d'étudier le comportement des pilotes lors de l'appontage et d'établir les fondements théoriques nécessaires à la conception de l'interface écologique pour améliorer la perception des pilotes et leur sécurité. L'interface inédite proposée résulte d'un processus de conception en 4 étapes : (1) une analyse du domaine de travail aéronaval basée sur les données bibliographiques pertinentes et les entretiens avec deux pilotes chevronnés ; (2) une analyse du comportement de pilotes en environnement immersif ; (3) une modélisation des possibilités d'appontage formalisées en tant qu'affordance d'appontabilité ; et (4) une évaluation en virtualité augmentée des bénéfices de l'interface visuelle conçue pour augmenter la perception de l'affordance d'appontabilité, et ainsi assister la prise de décision du pilote. Les principaux résultats obtenus mettent en évidence que les pilotes experts couplent les mouvements verticaux de leur appareil avec ceux du navire afin de minimiser la vitesse d'impact au moment du poser. Ce couplage apparaît dans la dernière phase de l'appontage (stationnaire) et s'intensifie lorsque le niveau de mer, et donc l'amplitude des déplacements du navire, augmentent. En effet, l'analyse des trajectoires de vol montre une corrélation significative entre les positions verticales de l'hélicoptères et du navire lorsque l'appareil est à proximité du pont d'envol. La force du couplage est lui-même corrélé à l'intensité de la vitesse d'impact de l'hélicoptère sur le pont. Le modèle d'affordance d'appontabilité (3), qui spécifie les possibilités d'apponter dans les limites de vitesse d'impact identifiées lors de l'analyse du domaine de travail (1), permet de questionner le rationnel de la stratégie de couplage observée (2). En effet, la modélisation rend visible un paysage d'affordance d'appontabilité à la topologie particulière, composé d'attracteurs (fenêtres de faibles vitesses d'impact) et repousseurs (fenêtres de forte vitesse d'impact) évoluant dynamiquement au fil du temps suivant les états du navire et de l'hélicoptère. L'étude numérique du modèle simplifié permet de généraliser ces observations pour des modèles réalistes. L'étude en virtualité augmentée (4) montre que le modèle rend bien compte des décisions d'apponter ou non. En effet, la fréquence des décisions d'apponter des participants est déterminée par la topologie du paysage d'affordance, les fréquences plus élevées étant observées au niveau des attracteurs et les plus basses au niveau des repousseurs. Ainsi, l'interface conçue pour visualiser l'affordance d'appontabilité améliore la distinction entre les situations d'appontage risquées et sûres en augmentant cet effet. Finalement, de futures développements et raffinements du modèle sont proposés pour l'appliquer à l'avenir dans ce domaine à forts enjeux.

Mots clefs : Affordance, Conception d'Interface Écologique, Appontage, Hélicoptère, Réalité Virtuelle

Visualizing affordances: the key to helicopter ship-deck-landing?

Director: Dr. Franck Ruffier (DR CNRS at Aix-Marseille University)

Co-Director: Dr. Antoine Morice (Aix-Marseille University)

Co-supervisor: Dr. Thomas Rakotomamonjy (ONERA),

Reviewers: Dr. Anne-Hélène Olivier (Rennes 2 University)
Prof. Isabelle Siegler (Paris-Saclay University)

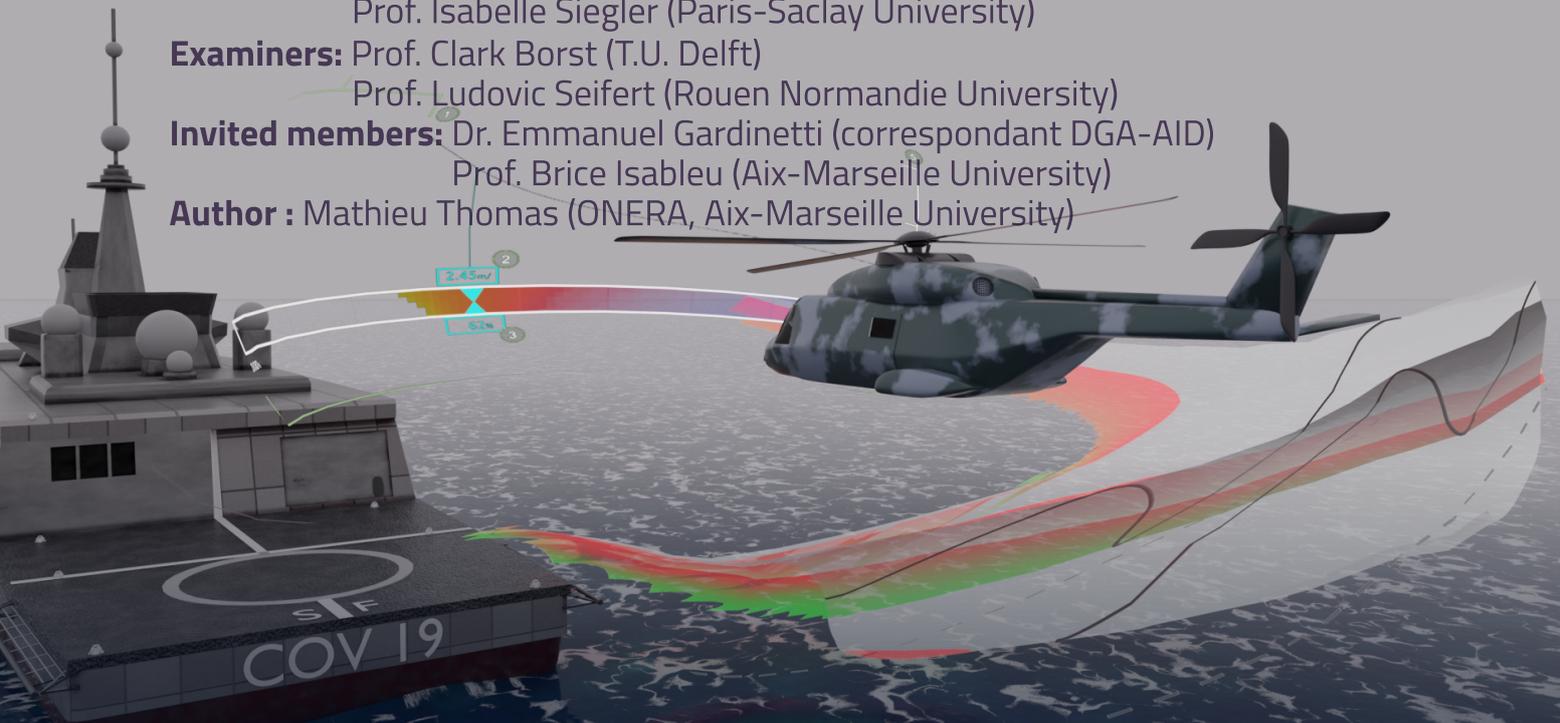
Examiners: Prof. Clark Borst (T.U. Delft)

Prof. Ludovic Seifert (Rouen Normandie University)

Invited members: Dr. Emmanuel Gardinetti (correspondant DGA-AID)

Prof. Brice Isableu (Aix-Marseille University)

Author : Mathieu Thomas (ONERA, Aix-Marseille University)



Thesis publicly defended on Oct. 05, 2023 at the Faculty of Sport Sciences, Marseille, FR

Abstract :

The safety of helicopter landings on ships (i.e., deck landings) requires an appropriate interface to prevent accidents associated with the pilots' perceptual limitations. In this doctoral thesis, a visual interface was designed and tested in virtual reality to enhance pilots' safety and performance. The innovative approach is based on the modeling of affordances, allowing for the study of pilots' behavior during deck landings and establishing the theoretical foundations necessary for the design of an ecological interface to improve pilots' perception and safety. The proposed novel interface resulted from a four-step design process: (1) an analysis of the aeronaval work domain based on relevant literature and interviews with two experienced pilots; (2) an analysis of pilots' behavior in an immersive environment; (3) the modeling of deck landing possibilities formalized as deck-land-ability affordance; and (4) an evaluation in augmented virtuality of the benefits of the visual interface designed to enhance the perception of the deck-land-ability and assist pilots' decision-making. The main findings highlight that expert pilots couple the vertical movements of their aircraft with those of the ship to minimize the impact velocity during touchdown. This coupling becomes apparent during the final phase of the landing and intensifies as the sea level, and thus the amplitude of the ship's movements, increases. Indeed, the analysis of flight trajectories shows a significant correlation between the vertical positions of the helicopter and the ship when the aircraft is in proximity to the flight deck. The strength of the coupling itself is correlated with the intensity of the helicopter's impact velocity on the deck. The affordance-based landing model (3), which specifies the landing possibilities within the identified impact velocity limits from the work domain analysis (1), allows for questioning the rationale of the observed coupling strategy (2). The modeling makes visible an affordance landscape with a particular topology, consisting of attractors (windows of low impact velocities) and repellers (windows of high impact velocities) dynamically evolving over time based on the states of the ship and the helicopter. The numerical study of the simplified model enables generalizing these observations to realistic models. The augmented virtuality study (4) demonstrates that the model effectively accounts for landing decisions. The frequency of participants' landing decisions is determined by the topology of the affordance landscape, with higher frequencies observed at attractor locations and lower frequencies at repeller locations. Thus, the interface designed to visualize the deck-land-ability enhances the distinction between risky and safe landing situations by amplifying this effect. Finally, future developments and refinements of the model are proposed to apply it in this high-stakes domain in the future.

Key words : Affordance, Ecological Interface Design, Ship-deck-landing, Rotorcraft, Virtual Reality

Remerciements

Certaines personnes se sont faites toutes seules. Pas moi. Je tiens donc à remercier en quelques lignes les nombreuses personnes m'ayant soutenu dans la réalisation de cette thèse.

En 2018 l'ONERA et l'AID s'accordaient pour financer un projet de thèse dont l'encadrement côté universitaire était assuré par l'ED SMH et l'ISM. Je suis profondément reconnaissant envers ces institutions pour avoir rendu ce projet possible. Je mesure la chance d'avoir bénéficié d'une éducation gratuite m'ayant amené au plus haut niveau d'étude.

En m'engageant dans l'aventure, je me doutais que la tâche serait dure mais enrichissante. J'étais loin de me douter à quel point.

Tout d'abord, je salue les membres du jury, pour leurs critiques constructives et la pertinence de leurs remarques, qui ont grandement participé à améliorer la qualité de ce manuscrit de thèse et ouvert des pistes de réflexions pour de futurs travaux.

A mes encadrants, mon équipe sur ce chemin sinueux, je vous suis extrêmement reconnaissant. Je retiens de chacun d'entre vous des qualités fortes, celles que j'aimerais réunir au cours de ma carrière.

Franck, ta claire-voyance et ta rigueur ont permis de canaliser l'audace et la fougue de mes débuts. Merci pour le sérieux de ton encadrement sur ces années de thèse et bien avant, pour monter le projet. J'espère que beaucoup auront la chance d'être encadrés par un scientifique comme toi.

Julien, si tu n'avais pas écrit un arbre décisionnel du choix des tests statistiques, je l'aurais sûrement fait moi-même en me basant sur tes connaissances. Mais outre tes savoirs, je voulais te remercier pour les conseils et l'attention du détail que tu as apporté à chaque réunion, chaque article, chaque figure, chaque interprétation de résultats... la liste est longue!

Thomas, je ne soulignerais pas les qualités de chercheur, ni celles d'ingénieur dont tu as fait la démonstration à d'innombrables reprises au cours de cette thèse, mais bien tes qualités humaines, notamment la plus précieuse à mes yeux et sans doute la plus rare, ta bienveillance. Pour qui a besoin d'aide, de conseil ou juste d'exposer une idée audacieuse, il est bon de toujours te trouver volontaire et à l'écoute.

Enfin Antoine, je peux dire avec certitude que je n'oublierai jamais nos discussions tant par leurs profondeurs et pertinences scientifiques que par leur fraîcheur. Ta faculté à construire avec engouement la science m'a beaucoup inspiré. On peut dire de toi que tu mets la main à la pâte ou même dans le cambouis, et en t'observant ainsi faire, j'ai été très vite convaincu qu'il me fallait moi aussi savoir m'adapter, apprendre à faire, cultiver la faculté de franchir le pas entre l'idée et son implémentation.

Maman, papa, je ne souhaite pas écrire ici à quel point je vous suis reconnaissant, j'aimerais garder la surprise pour mon discours si un jour je touche un oscar, un prix Nobel ou une médaille olympique. Le prix Pulitzer m'irait aussi.

Encore merci.

Table des matières

Affidavit	2
Liste de publications et participation aux conférences	3
Résumé	4
Abstract	6
Remerciements	8
Table des matières	10
Table des figures	13
Liste des tableaux	17
1. Introduction	18
Introduction	18
1.1. Problème dans l'aviation	18
1.2. Ask you not what's inside your head but what your head's inside of . . .	20
1.3. What your head is inside off : un environnement porteur de sens	22
1.4. Les affordances : objets de la perception	23
1.4.1. Implication pour l'étude du comportement	24
1.4.2. Les affordances dans un environnement complexe	25
1.5. Multiplicité des affordances : l'AH comme outil de description	28
1.5.1. Les cinq niveaux de l'AH	30
1.6. La forme	32
1.6.1. Information disponible (spécificité)	32
1.6.2. D'information disponible à information perçue	34
1.7. Objectifs et hypothèses	36
2. Analyse du domaine de travail	38
2.1. Introduction	38
2.2. Méthode	39
2.2.1. Matériel et ressources	39
2.2.2. Entretiens avec les pilotes	41
2.3. Résultats	42
2.3.1. Principes généraux du vol de l'aile	42

2.3.2.	Principes du vol d'hélicoptère	43
2.3.3.	Le contrôle du vol	44
2.3.4.	Quelques limites générales de l'hélicoptère	49
2.3.5.	L'hélicoptère en milieu maritime : l'appontage	52
2.3.6.	Environnement maritime	53
2.3.7.	Procédure d'appontage	55
2.3.8.	Organisation en AH	56
2.4.	Discussion	67
2.4.1.	Accéder à l'expertise	68
2.4.2.	L'appontage une succession d'affordances?	68
2.4.3.	Autres phases de CWA	69
2.5.	Conclusion	71
3.	Stratégie de pilotage	72
3.1.	Objectif scientifique de la 1 ^{ère} <i>expérimentation</i>	72
3.1.1.	Affordances séquentielles	72
3.2.	Travail de l'équipe / crédits	73
3.3.	Articles	73
4.	Modélisations	90
4.1.	Objectifs	90
4.2.	Développements	92
4.2.1.	Modèle hélicoptère	92
4.2.2.	Modèle navire	93
4.3.	Simulations numériques	94
4.3.1.	Méthode	94
4.3.2.	Résultats stationnaire absolu	95
4.3.3.	Comparaison au modèle plus réaliste	96
4.3.4.	Résultats modèle plus réaliste	97
4.3.5.	Simulation de la synchronisation hélicoptère - navire	98
4.3.6.	Résultats simulation synchronisation	98
4.3.7.	Comparaison stratégie de couplage et stationnaire absolu	99
4.4.	Discussion et conclusion	101
4.4.1.	Intérêt d'une stratégie de couplage	102
4.4.2.	Perspectives de simulations futures	103
4.4.3.	Augmenter le réalisme des modèles numériques	103
4.4.4.	Direction	104
5.	Etude empirique de la perception de l'affordance d'appontabilité	105
5.1.	Objectif scientifique de la 2 ^{ème} <i>expérimentation</i>	105
5.2.	Travail de l'équipe et crédits	106
5.3.	Articles	106
5.4.	Discussion	122
5.4.1.	Réalisme et implémentations de la simulation	122

5.4.2. Réalisme et enjeux	122
5.4.3. Novices vs experts	123
6. Discussion	125
Discussion	125
6.1. Le contrôle de l'action selon la perception directe	125
6.1.1. Régulation du vol basé sur des lois de contrôle	125
6.1.2. Régulation du vol basé sur les affordances	126
6.1.3. Le rôle des affordances dans la coopération humain-machine / le cockpit du futur	126
6.1.4. Couplage hélicoptère-frégate	127
6.2. La spécification de l'affordance d'appontabilité	128
6.2.1. Spécifier la dynamique du pont (rythmicité)	128
6.2.2. Rôle du couplage dans la spécification multimodale	133
6.2.3. Invariants optiques candidats	135
6.3. Perspectives	136
6.3.1. Structure de l'EID : Vers des assistances prenant en compte de multiples contraintes	136
6.3.2. Développement à partir de la physique du navire	137
6.3.3. Enrichir la méthode EID : la forme	139
6.3.4. Proposition d'évolution de l'interface	140
6.3.5. Elargir aux autres phases de l'appontage	143
Conclusion	145
Bibliographie	148
ANNEXES	174
A. Supplemental data de la 1 ^{ère} expérience	175

Table des figures

1.1. Positions (déplacements) d'une fourmi du désert (<i>Cataglyphis</i>) dans le sable (A), tiré de WEHNER 2003 et trajectoire d'un hélicoptère à l'appontage, enregistrée sur simulateur de vol par José Márcio Pereira FIGUEIRA, TAGHIZAD et ABID 2017 (B). Les déplacements de la fourmi et de l'hélicoptère sont semblables, d'apparence complexe, constitués de détours abrupts comme l'observait Simon (SIMON 2008).	26
1.2. Organisation hiérarchique et relation entre de multiples affordances imbriquées. Reproduit d'après Kim J VICENTE et Jens RASMUSSEN 1990	30
1.3. Composition d'un planimètre mesurant le périmètre d'une aire (<i>area to be measured</i>). D'après RUNESON 1977.	35
2.1. Principales ressources bibliographiques utilisées pour l'analyse du domaine de travail.	40
2.2. Le repère aéronautique est par convention orienté vers le bas. L'hélicoptère est composé d'un moteur (<i>powerplant</i>), entraînant un rotor de queue (<i>tail rotor</i>) et un rotor principal (<i>main rotor</i>) générant une portance (<i>thrust</i>). Tiré de Gareth D PADFIELD 2008.	42
2.3. Effets des commandes sur les niveaux d'énergies, représentés sous forme de diagramme de flux, inspiré des travaux de Matthijs H J AMELINK et John M FLACH 2003 dans le cadre de l'avion et adapté au cas de l'hélicoptère. La commande de pas collectif contrôle la puissance totale injectée dans le système et fournie par le moteur et entraîne une rotation de la cabine suivant l'axe de lacet. Le palonnier contrôle l'anti-couple qui va contrer l'énergie en rotation due au rotor principal. Le collectif enfin, va distribuer l'énergie restante entre énergie potentielle (fonction de l'altitude de l'appareil) et l'énergie cinétique (fonction de la vitesse de déplacement).	46
2.4. Les 6 indicateurs principaux constituant le PFD indiquent la vitesse air (A1), l'attitude (B1), la vitesse verticale (A2), le cap (B2), l'altitude (A3) et le dérapage (B3). Depuis <i>Instrument Flying Handbook (FAA-H-8083-15A)</i> 2011	48

2.5. Diagramme type de vitesse – puissance d’un hélicoptère. Les puissances induites (<i>induced</i>), parasite (<i>parasite</i>) et de profil (<i>profile</i>) s’additionnent pour former la courbe de puissance totale (<i>total</i>) requise pour voler à un régime et une vitesse d’avancement donnée. La forme en U caractéristique de cette courbe indique qu’un régime de vol optimal existe pour lequel la puissance requise est minimale, ici aux alentours de 80 noeuds. Tiré de PROUTY 1995.	50
2.6. SHOLs typique. Le polar indique les limites de vol (lignes noires pleines) en fonction de la vitesse (<i>Wind Speed</i>) et de l’intensité (<i>Wind Direction</i>) du vent relatif au navire. <i>Red</i> : bâbord, <i>Green</i> , tribord. On voit que les vents arrière (sous 90 bâbord et tribord) ne permettent pas l’appontage pour ce couple hélicoptère navire précis. Tiré de NEVILLE 2014.	52
2.7. Hélicoptère type dauphin livrant du matériel sur la frégate multi-missions Aquitaine. Au premier plan le "chien jaune" guidant le pilote par signe. Depuis https://www.colsbleus.fr/	54
2.8. Structure d’une opération d’après Gareth D PADFIELD 2008. Une opération (<i>operation</i>) se décline en missions (<i>mission</i>) composées elles-mêmes de phases élémentaires (<i>MTE</i>) constituées de manoeuvres (<i>manoeuvre</i>).	55
2.9. Deux grandes phases de l’appontage (reproduites à partir de HERRY 2010). L’approche (gauche - orangée) débute à environ 1,5 milles nautiques du navire et 500 pieds d’altitude. Le pilote suit un profil d’approche commandé, essentiellement par lecture instrumentale. La phase de stationnaire (droite - bleue) se déroule à quelques dizaines de pieds à la verticale du point de poser. Le pilote vole à vue et déclenche le poser lorsqu’il estime les conditions sûres. La trajectoire idéale de l’appareil est projetée en bleu ciel (échelle non représentative).	56
2.10. Hiérarchie d’abstraction d’un hélicoptère appontant sur navire type frégate, à partir de la phase d’approche jusqu’au poser final. En couleurs les sources principales pour chaque éléments. Conteneurs verts : phase d’approche, bleus, phase de stationnaire et rouge phase de poser. . . .	59
2.11. Phases élémentaires de l’appontage et points de transitions entre ces phases d’après les entretiens avec les pilotes ALAT et Aéronavale. . . .	64
2.12. AH pour la phase d’approche (point de repère B à 4 sur la figure 2.11), d’après les entretiens pilotes.	65
2.13. AH pour la phase d’analyse du navire (point de repère 4 sur la figure 2.11) d’après les entretiens pilotes.	65
2.14. AH pour la phase de stationnaire (point de repère 5 sur la figure 2.11) d’après les entretiens pilotes.	66
2.15. AH pour la phase de poser (contact avec le pont, point de repère 6 sur la figure 2.11), d’après les entretiens pilotes.	66

2.16. Représentation issue de la phase d'analyse de la tâche de contrôle appliquée au système tactique AEW&C, d'après NAIKAR, MOYLAN et PEARCE 2006. En bleu, les situations de travail dans lesquels sont réalisées des fonctions de travail (cercles).	70
2.17. Les différentes phases du CWA selon Kim J VICENTE 1999 et Jens RASMUSSEN, PEJTERSEN et GOODSTEIN 1994. Tiré de NAIKAR, MOYLAN et PEARCE 2006. Ensemble ces phases permettent une analyse du domaine de travail, de l'activité et des compétences des travailleurs	71
4.1. Le modèle d'hélicoptère comprend la portance L et le poids (force d'attraction due à la gravité) $m \times g$ s'appliquant en sens opposé, au centre de gravité de l'hélicoptère.	92
4.2. Simulation des possibilités d'appontage pour un hélicoptère de 10 tonnes en stationnaire dans le repère terrestre à 5m, à la verticale d'un navire oscillant à une amplitude de 2.5m et une fréquence de 0.14Hz	95
4.3. Simulation des possibilités d'appontage pour un hélicoptère modélisé sous forme d'états linéarisés autour d'un point d'équilibre en stationnaire. L'hélicoptère est en stationnaire dans le repère terrestre à 5m, à la verticale d'un navire oscillant suivant un modèle fréquentiel RAO	98
4.4. Simulation des possibilités d'appontage pour un hélicoptère de 10 tonnes en stationnaire relatif au navire à 5m, à la verticale d'un navire oscillant à une amplitude de 2.5m et une fréquence de 0.14Hz	99
4.5. Distribution des vitesses d'impact constituant les paysages d'appontabilité pour un stationnaire absolu dans le repère terrestre (noir) et un stationnaire relatif (rouge) maintenus à 3m (A) et 5m (B). V_{crit} est la vitesse critique au delà de laquelle le poser sûr n'est plus permis.	101
6.1. Transfert d'énergie calculé pour un spectre de vague d'après les mesures du projet JONSWAP (K. HASSELMANN, BARNETT, BOUWS et al. 1973	130
6.2. Différentes hiérarchies dans les structures sont plus ou moins cohérentes. Reproduit depuis M. R. JONES et BOLTZ 1989	132
6.3. Angle d'évasement (B – D) et de dépression (A – C) pour une altitude de 2m (A – B) et 10m (C – D).	136
6.4. Spectre de pilonnement stable (A) et instable (B). Reproduit d'après FOURIE et T. JONES 2015	138
6.5. Proposition d'évolution de l'assistance basée sur le modèle d'affordance.	142
6.6. <i>Tunnel in the sky display</i> pour une pente d'approche de degrés, vu de profil (A) et de l'intérieur (B). Reproduit depuis ZEILSTRA, REUS et KONING 2015.	144

1. Méthode de traitement des données analysée à la 1^{ère} expérience représentée sur un cas représentatif de trajectoire de vol. En haut, traitement (filtrage et interpolation) des positions de l'hélicoptère (*Rotorcraft raw signal*) et activité sur la commande de pas collectif (*Collective control*) augmentant vers la fin de l'appontage (phase de stationnaire et poser). Graphique du milieu, Calcule des coefficients de corrélation ρ entre le signal filtré et interpolé de l'hélicoptère (*rotorcraft*) et les positions du pont d'envol du navire (*deck*) dans chacun des segments de distance au pont (*bin's limit*) calculés sur la base de la vitesse de l'hélicoptère relative au pont (*Rotorcraft velocity relative to the deck*) présentée sur le graphique du bas. 175

Liste des tableaux

1. Introduction

L'appontage, l'atterrissage d'hélicoptère sur un navire, est une activité périlleuse, se déroulant dans un environnement complexe. En effet, les pilotes doivent composer avec un environnement incertain, un point de poser instable et ponctuel, une aérodynamie perturbée et un véhicule (l'hélicoptère) à la dynamique instable, dans les trois dimensions. Le constat de cette complexité nous pose deux questions. Premièrement, comment les pilotes sont-ils capables de mener à bien une telle activité avec succès? Plus précisément, quelles sont les stratégies et les processus cognitifs à l'œuvre? Fondamentalement, ce point nous ramène au questionnement plus généralement abordé dans les sciences cognitives, celui de comprendre comment un agent mène à bien son activité, dépasse les problèmes auxquels il est confronté pour atteindre ses objectifs. Deuxièmement, le constat de cette complexité, couplé à celui du risque lié à cette activité si périlleuse, propose au concepteur un challenge passionnant : comment assister au mieux les pilotes lors de l'appontage? Comment améliorer la sécurité et la performance de ces experts? Ces deux questions sont intrinsèquement liées et forment les fondements de cette thèse.

1.1. Problème dans l'aviation

L'aéronautique en générale, est un domaine extrêmement exigeant dans lequel la sécurité est une préoccupation primordiale. Le facteur humain y est la source principale d'accidents (Mica R. ENDSLEY et GARLAND 2000; JENSEN 1982) et l'appontage ne déroge pas à la règle : un rapport interne (ONERA) rapporte que plus de 80% des incidents / accidents à l'appontage sont dus à des erreurs humaines, des erreurs « d'appréciation » (HERRY 2010). Ces erreurs d'appréciation ne sont pas sans rappeler le concept de conscience de la situation (*Situation Awareness* – SA), dont l'altération est considérée comme la cause principale d'accidents / incidents dans l'aviation militaire (HÄRTEL, KA SMITH et PRINCE 1989) et civile (Mica R ENDSLEY 1995). La conscience de la situation est en effet définie, dans son sens le plus large, comme « une conscience appropriée de la situation » (Kip SMITH et HANCOCK 1995), c'est avoir conscience de ce qu'il se passe réellement. C'est un concept qui est lié à d'autres phénomènes déterminants pour la sécurité du vol. Notamment, la conscience de la situation peut être altérée par l'augmentation de la charge mentale de travail et altérer à son tour la capacité à prendre des décisions adéquates / appropriées, résultant globalement en une diminution de la performance et de la sécurité (Mica R. ENDSLEY et GARLAND 2000; MAGNUSSON NÄHLINDER 2009; NÄHLINDER 2004).

Cela étant dit, ces problèmes ne sont pas une fatalité, des solutions existent qui permettent de répondre aux difficultés que rencontrent les pilotes. La conception d'assistance est une des solutions envisagées par de nombreuses équipes cherchant à améliorer la sécurité et la performance dans le domaine aérospatial (FRIESEN, PAVEL, Clark BORST et al. 2020; Gareth D. PADFIELD, David N. LEE et R. BRADLEY 2003; Neville A. STANTON, Katherine L. PLANT, Aaron P. ROBERTS et al. 2016b; WALKO et MAIBACH 2021). Plus précisément, des assistances conçues en suivant les principes de conception écologiques (EID) ont prouvé leur efficacité pour réduire la charge mentale de travail (ANOKHIN, IVKIN et DOROKHOVICH 2018; KING, READ et SALMON 2022; SCHEWE et VOLLRATH 2020), améliorer la conscience de la situation (C. BURNS, G. JAMIESON, SKRAANING et al. 2007; C. M. BURNS, SKRAANING, G. A. JAMIESON et al. 2008; KIM, SUH, JANG et al. 2012; SATUF, KASZKUREWICZ, SCHIRRU et al. 2016) et la performance (LAU, VELAND, KWOK et al. 2008) dans des domaines de travail complexes et à haut risque. L'aviation est en effet un domaine privilégié d'application de ces principes de conception (MCILROY et Neville A. STANTON 2015). Plus spécifiquement, la conception d'interfaces écologiques s'est montrée pertinente dans le domaine aéronautique, puisqu'elle a entre autres permis aux pilotes d'améliorer leurs consciences du terrain (C. BORST, SJER, M. MULDER et al. 2008; C. BORST, M. MULDER et VAN PAASSEN 2010), le contrôle de leurs trajectoires et de leurs vitesses de vol (Matthijs H J AMELINK 2002; Matthijs H J AMELINK et John M FLACH 2003), la résolution de conflits de séparation et l'évitement d'obstacles (J. ELLERBROEK, BRANTEGEM, M. M. v. PAASSEN et al. 2013). Ces réussites ne sont pas surprenantes car les principes EID (Kim J. VICENTE 1996; K. VICENTE, CHRISTOFFERSEN et PEREKLITA 1995; Kim J VICENTE et Jens RASMUSSEN 1990; K. VICENTE et J. RASMUSSEN 1992) sont spécialement adaptés (car originellement développés) pour assister les opérateurs dans des domaines de travail complexes (K. VICENTE et J. RASMUSSEN 1992) dont l'aéronautique fait partie.

Fondamentalement ces principes entretiennent un lien étroit avec une théorie de la cognition humaine elle-même qualifiée d'écologique (James J. GIBSON 2014). C'est expressément parce que l'approche écologique offre un cadre théorique permettant de composer avec la complexité qu'elle nous semble tout indiquée pour 1) comprendre les comportements des pilotes à l'appontage et 2) concevoir une assistance pour cette tâche. Ce deuxième point fait référence au "problème du concepteur" (K. VICENTE et J. RASMUSSEN 1992), qui se pose en deux temps. Premièrement, comment décrire la complexité du domaine de travail? Répondre à cette question permet de déterminer le contenu et la structure informationnelle d'une IHM et elle requière un formalisme de la complexité du domaine de travail étudié. Deuxièmement, comment communiquer l'information à l'opérateur? La réponse à cette question détermine la forme de l'interface et se fonde sur un modèle des mécanismes perceptifs et cognitifs permettant aux opérateurs de gérer une situation complexe. Pour anticiper sur les chapitres suivants, deux outils sont proposés par Vicente et Rasmussen : la hiérarchie d'abstraction (Jens RASMUSSEN 1985) et le SRK (Jens RASMUSSEN 1983), qui répondent respectivement aux besoins de formaliser la complexité du domaine de travail et les mécanismes des opérateurs. Le but de ce chapitre introductif sera d'éclairer les fondements théoriques

1. Introduction – 1.2. Ask you not what's inside your head but what your head's inside of

des principes EID, leurs liens avec l'approche écologique et la pertinence de ces approches pour l'étude du comportement et la conception d'assistance en situations complexes tel que l'appontage. Sans plus tarder, qu'est-ce que l'écologie?

En résumé

Dans le domaine de l'aviation **le facteur humain est la cause principale d'accident et incident**. Améliorer la conscience de la situation et la prise de décision et diminuer la charge de travail sont autant de leviers pour améliorer la sécurité de manœuvres aéronautiques tel que l'appontage. **Des interfaces conçues en suivant les principes EID** permettent d'activer ces leviers et semblent tout indiquées à la **complexité** des opérations aéronautiques. Les chapitres suivants introduisent les concepts clefs et la philosophie des approches écologiques de la perception et de l'action et de la conception d'interfaces

.....

1.2. Ask you not what's inside your head but what your head's inside of

Qu'il s'agisse d'assister un opérateur dans son interaction avec son domaine de travail ou simplement de comprendre comment cette interaction a lieu, le point de départ de la démarche demeure philosophiquement le même. Pour les écologistes cela consiste à replacer la cognition dans l'environnement car c'est dans l'environnement que réside le problème que l'agent / l'opérateur cherche à résoudre. En effet, comprendre le comportement d'un agent nécessite de comprendre le problème auquel celui-ci fait face. Pour reprendre la métaphore de Marr (MARR 1982), il est souvent plus facile de comprendre un algorithme en comprenant le problème auquel il cherche à répondre que l'ordinateur sur lequel il est implémenté. De même, dans le cas de la conception d'interface, Bennett et Flach soutiennent que "*The effectiveness of an interface ultimately depends on how well it specifies the problems to be solved. And the problems reside not in the head, but rather in the work ecology.*" (BENNETT et John M. FLACH 2011, p38). L'écologie, en somme, c'est donc replacer l'agent dans son environnement, l'opérateur dans son domaine de travail, le pilote dans son système hélicoptère navire. C'est se poser la question du lieu de la cognition (un corps dans son environnement – l'écologie) plutôt que de son support (l'esprit, le cerveau), une posture que Mace (MACE 1977) résume élégamment dans son titre phare "*ask you not what's inside your head but what your head's inside off*". De cette façon l'approche écologique s'oppose aux théories classiques (e.g. cognitivisme, computationnalisme, le "cerveau ordinateur") en rejetant la séparation du corps et de l'esprit (où le corps serait le lieu de l'action et l'esprit celui de la cognition), proposant une vision incarnée (reconnaissance du rôle du corps, donc du monde de la matière et donc de l'environnement dans la cognition, J. FLACH et VOORHORST 2017).

1. Introduction – 1.2. Ask you not what's inside your head but what your head's inside of

Plus précisément, Gibson (James J. GIBSON 2014) défend la thèse d'un environnement riche et sensé qui permet la perception directe (sans inférences) de possibilités d'actions (affordances). Ces deux points, 1) la perception directe de 2) l'environnement porteur de sens, se transposent à la conception d'interface. Une IHM conçue écologiquement encourage l'accès direct à une information sensée sur l'état du système contrôlé. Ainsi les inférences sont limitées, réduisant la charge de travail de l'opérateur, et les erreurs apparaissent plus flagrantes (Clark BORST, John M. FLACH et Joost ELLERBROEK 2015). La conception d'interface écologique résulte en un système plus sûr. L'opérateur n'y est plus simplement perçu comme une limite, une source d'erreur du fait de ses propres capacités cognitives et perceptives limitées. A la place, il est considéré comme une source de résolution de problèmes, un solutionneur de complexité expert, capable de faire face à des situations inédites (J. FLACH et VOORHORST 2017; SIMON 2008). Le rôle de l'IHM devient alors celui d'un support pour faciliter cette capacité de résolution de problèmes, même inédits, grâce à une représentation adéquate de la situation (Kim J. VICENTE 1996), facilitant la conscience de la situation (BANBURY et TREMBLAY 2004; Clark BORST, John M. FLACH et Joost ELLERBROEK 2015) et le productive thinking (DUNCKER et LEES 1945). C'est dans cette mesure qu'une IHM conçue écologiquement assiste l'opérateur.

En résumé

L'approche écologique de la perception et de l'action embrasse **la complexité**. Dans son essence il s'agit d'une approche **systémique** — qui prône une réciprocité / **circularité perception-action** et une **indivisibilité agent-environnement** (LUYAT et REGIA-CORTE 2009) — qui en fait une approche plus adaptée à l'étude de la complexité que des approches analytiques dont la décomposition de la cognition en "dominos" / "suite d'opérations et traitements" détruit la complexité (car le tout diffère qualitativement de la somme de ses parties constituantes). Appliquée à l'étude du comportement l'Approche écologique postule que **la perception est directe et sensée**. Elle trouve écho dans **les principes de conception d'interface écologique** qui **encouragent l'accès directe à une information sensée sur l'état du domaine de travail**. Le chapitre suivant développe la notion de sens (*meaning*) d'un point de vue écologique et le distingue de sa définition classique (computationalisme). Le parallèle avec la conception d'interface est souligné. L'immédiateté de la perception sera couverte par la suite.

.....

1.3. What your head is inside off : un environnement porteur de sens

C'est en observant l'environnement dans lequel nous évoluons que Gibson constate que celui-ci est sensé (porteur de sens). Ainsi les premiers chapitres du livre de 1979 ne traitent pas de processus psychologiques *per se*, mais bien de ce que Gibson nomme "la physique écologique" (*ecological physics*, James J. GIBSON 2014), c'est-à-dire la description de l'environnement, qu'il distingue du monde physique. Le monde physique englobe tout ce qui va du subatomique infiniment petit aux fins de notre univers infiniment grand. C'est un monde dont la structure est indépendante de l'existence d'un agent, que les sciences mesurent généralement en unités métriques, c'est un monde de géométries dépourvu de sens (CHRISTOPHER C PAGANO et DAY 2019). Pour qu'un tel monde physique ait un sens pour un agent, alors il doit lui être imposé par ce dernier. Le sens appartient alors uniquement à l'immatériel, en tant qu'il est construit dans l'esprit de l'agent puis projeté sur un monde physique. L'étude de la cognition/perception dans un monde physique devient alors une recherche de la construction de ce sens, de ces valeurs, à partir d'unités métriques, de propriétés extrinsèques à l'agent (FODOR 1968; NEISSER 2014).

L'environnement cependant se distingue du monde physique, et est porteur de sens. En effet, l'homme n'est pas sensible à ces extrêmes infiniment grands et petits, il ne perçoit pas l'atome, la galaxie, il évolue dans un monde de surfaces, de médiums et de substances dont la disposition lui spécifie quels comportements lui sont permis. C'est précisément dans la mesure où un agent perçoit l'environnement en tant que ce que celui-ci lui permet, que l'environnement est sensé. Il s'agit d'un sens qui existe dans la relation d'un agent avec son environnement, que l'agent doit découvrir plutôt qu'imposer. C'est un sens fonctionnel sous-tendu par un lien indissociable entre un agent et son environnement (HEFT 2007; TURVEY et R. E. SHAW 1999; William H. WARREN 2006). En d'autres termes, un environnement est sensé car sa disposition permet certaines actions, l'atteinte de certains buts, pour un agent disposant de certaines caractéristiques. Ce que l'environnement permet à l'agent Gibson le nomme *affordance* et le définit comme "*ce que l'environnement offre à l'animal, ce qu'il lui fournit, pour son bien ou pour son mal*" (James J. GIBSON 2014, p127).

En résumé

L'accès à l'information ne requiert pas d'inférence (ou autre médiation / processus interne). Ainsi, le sens est directement prélevé (il s'agit de l'*information pick-up*). L'affordance **est la possibilité d'action**, la possibilité **d'atteindre un but**. L'affordance est donc sensée, c'est-à-dire porteuse d'un sens qui est **fonctionnel et encré dans l'environnement** (en référence à un agent). Ce sens s'oppose à un sens qui doit être reconstruit dans l'esprit à partir d'unités extrinsèques (métriques) dans un monde de géométrie. Le chapitre suivant définit plus précisément le concept d'affordance

et décrit ses caractéristiques et sa place centrale dans la théorie de la perception direct.

.....

1.4. Les affordances : objets de la perception

L'affordance occupe une place centrale dans la théorie écologique car elle est l'objet de la perception, l'unité fondamentale selon laquelle un agent perçoit son environnement (Jeffrey B. WAGMAN et Thomas A. STOFFREGEN 2020; Leonard S. MARK 1987). Depuis l'étude pionnière de Warren (William H WARREN 1984) de nombreuses études ont mis en évidence la perception d'affordances variées telles que la passabilité d'une ouverture (FATH et Brett R FAJEN 2011; RIEHM, CHEMERO, SILVA et al. 2019; William H. WARREN et WHANG 1987), l'atteignabilité (CARELLO, GROSOFSKY, REICHEL et al. 1989; MASONER, CLARK, DOWELL et al. 2019; WEAST et PROFFITT 2018), l'interception d'une cible (BASTIN, Brett R. FAJEN et MONTAGNE 2010; ROESSLING et B. FAJEN 2020), l'attrapabilité d'une balle (OUDEJANS, Claire F MICHAELS, BAKKER et al. 1996; D. POSTMA 2019; D. POSTMA et F. ZAAL 2017), la freinabilité d'un véhicule (Brett R. FAJEN 2005; B. R. FAJEN 2008), ou encore la traversabilité d'une route (David N LEE, YOUNG et MCLAUGHLIN 1984; AZAM, CHOI, CHUNG et al. 2017; PLUMERT, KEARNEY et CREMER 2004). Des études montrent même la faculté des participants à percevoir les affordances pour des personnes tierces (Leonard S MARK 2007; Verónica C RAMENZONI, Michael A RILEY, SHOCKLEY et al. 2008a; Verónica C RAMENZONI, Michael A RILEY, SHOCKLEY et al. 2008b; V. RAMENZONI, Michael A RILEY, T. DAVIS et al. 2008; Verónica C. RAMENZONI, T. J. DAVIS, Michael A. RILEY et al. 2010; Thomas A. STOFFREGEN, GORDAY, SHENG et al. 1999).

Nous l'avons vu les affordances sont sensées, une caractéristique qui importe pour la conception d'assistance que l'on souhaite également convier une information sensée. Mais les affordances ne sont pas simplement sensées, elles présentent d'autres caractéristiques fondamentales (Brett R. FAJEN, M. A. RILEY et Michael T. TURVEY 2008) que nous développons succinctement ci-après dans le but de clarifier le concept.

Premièrement, les affordances sont réelles. Elles existent indépendamment de leur réalisation (Claire F MICHAELS 2003). Parce qu'elles dépendent des caractéristiques réelles de l'animal et de l'environnement, elles font partie de l'ontologie quand bien même elles ne seraient pas réalisées (actualisées) par l'animal.

Deuxièmement les affordances sont spécifiques à l'agent car elles sont définies par rapport à ses capacités d'action propres. Des agents aux caractéristiques différentes, imaginons l'un avec un pouce préhenseur et l'autre non, différent dans leurs capacités d'actions. Les affordances sont donc subjectives bien que mesurables (Brett R. FAJEN, M. A. RILEY et Michael T. TURVEY 2008).

1. Introduction – 1.4. Les affordances : objets de la perception

Troisièmement, les affordances capturent la réciprocité perception – action, selon laquelle l'action modifie la perception et vice versa. L'action et la perception forment une boucle de sorte que l'action se nourrit de la perception et toute action génère des modifications dans le flux perceptif qui nourrit à son tour la perception (Brett R. FAJEN, M. A. RILEY et Michael T. TURVEY 2008). Nous reviendrons sur ce point lorsque nous aborderons la notion d'invariants et de mouvements exploratoires.

Quatrièmement, les affordances permettent le control prospectif de l'action. Elles permettent de réguler le comportement par rapport à un état future de la situation. Les affordances, en effet, sont des possibilités. Or le possible appartient au présent et à l'avenir. Une action est possible au moment présent et engendrera des modifications au moment de sa réalisation, à l'avenir (CARR 1986; HEFT 2003). Le comportement n'est donc pas réduit à une réaction par rapport à une situation courante, mais contient une forme d'anticipation, à partir de la situation courante, d'une évolution possible.

Enfin, les affordances sont dynamiques. Elles apparaissent et disparaissent au grès des situations, à plus ou moins long terme. C'est le cas par exemple de l'attrapabilité (*catchability*, D. B. POSTMA, LEMMINK et F. T. ZAAL 2018) d'une balle au baseball. La balle est attrapable pour un receveur pendant un laps de temps infime, après lequel, s'il ne s'est pas mis à courir le receveur sera dépassé et la balle devenue irrattrapable. A plus long terme, avec la fatigue du match, en fin de partie, ce même receveur dans la même situation ne sera plus capable de fournir l'effort nécessaire pour attraper la même balle.

Cependant, bien que ce concept soit central dans la théorie, et que les écologistes s'accordent sur les caractéristiques des affordances énumérées ci-dessus, des débats subsistent au sein de la communauté quant à sa définition formelle. Dans cette thèse nous retiendrons la définition de Stoffregen (Thomas A STOFFREGEN 2003) d'une affordance en tant que propriété émergente du système animal environnement. L'affordance n'est ni une propriété de l'environnement ni une propriété de l'agent. Il s'agit d'une propriété au niveau du système agent-environnement, une propriété au niveau du "*tout*" qui diffère qualitativement de la simple somme de ses parties constituantes (Thomas A. STOFFREGEN et MANTEL 2015). Cette définition souligne que la réciprocité animal-environnement est au cœur de l'approche écologique. Le système A/E en constitue le niveau d'analyse (Claire F. MICHAELS et PALATINUS 2010; LOMBARDO 1987).

1.4.1. Implication pour l'étude du comportement

Les affordances ainsi définies définissent à leur tour la notion de comportement. Le comportement d'un agent est l'actualisation (la "réalisation") d'une affordance complémentant un but ou une intention (Thomas A STOFFREGEN 2003). En effet à chaque instant une multitude d'affordances s'offrent à un agent. Ce dernier peut par

1. Introduction – 1.4. Les affordances : objets de la perception

exemple monter un escalier si le ratio de longueur de jambe par rapport à la hauteur des marches est adéquat, ou marcher sur une surface dont la résistance prise en rapport à sa masse est adéquate. Il peut choisir de s'asseoir si cela lui est permis selon la même règle de relation adéquate. Cependant parmi la multitude d'affordances qui sont permises à un agent dans une situation donnée, seule un nombre infime est réalisé. L'agent choisi, parmi l'infinité de possibles, selon ses intentions (Thomas A STOFFREGEN 2003). Si le but de l'agent est de s'asseoir alors l'intention de s'asseoir et l'affordance complémentaire d'assise mèneront à l'actualisation de l'affordance en question : l'agent s'assoie. Ce point est essentiel car il définit notre méthode d'étude du comportement. Comprendre le comportement d'un agent c'est comprendre les contraintes avec lesquelles il doit composer et ses intentions au sein du système, c'est comprendre que le comportement n'est pas simplement mécanique mais bien intrinsèquement fonctionnel (REED 1982; REED 1988; REED 1996). Se faisant, même des comportements d'apparence complexes peuvent être appréhendés avec clarté.

1.4.2. Les affordances dans un environnement complexe

En effet Simon (SIMON 2008), écrit que la complexité du comportement d'un agent n'est souvent que le reflet de la complexité du problème qu'il cherche à résoudre. Or, pris dans le référentiel adéquat, cette complexité se simplifie (BANBURY et TREMBLAY 2004). Le référentiel dont il parle est celui des contraintes, des ressources et des buts, qui dépendent à la fois des caractéristiques de l'agent et de celles de l'environnement dans lequel il évolue. En d'autres termes, il s'agit de décrire le comportement en fonction des affordances et des intentions. Pour l'illustrer Simon décrit le comportement d'une fourmi sur la plage. En l'observant il se rend compte que le déplacement de cette dernière, lorsqu'on le trace sur une feuille blanche, apparaît irrégulier, complexe, difficile à décrire, formé d'angles et de lignes, de détours et de rebroussements. La figure 1.1 A illustre une trajectoire réelle de fourmi. Mais cette complexité (du comportement) nous dit-il n'est que le reflet de la complexité du problème auquel la fourmi est confrontée, et ce problème réside dans l'écologie de la fourmi, par rapport à la fourmi.

1. Introduction – 1.4. Les affordances : objets de la perception

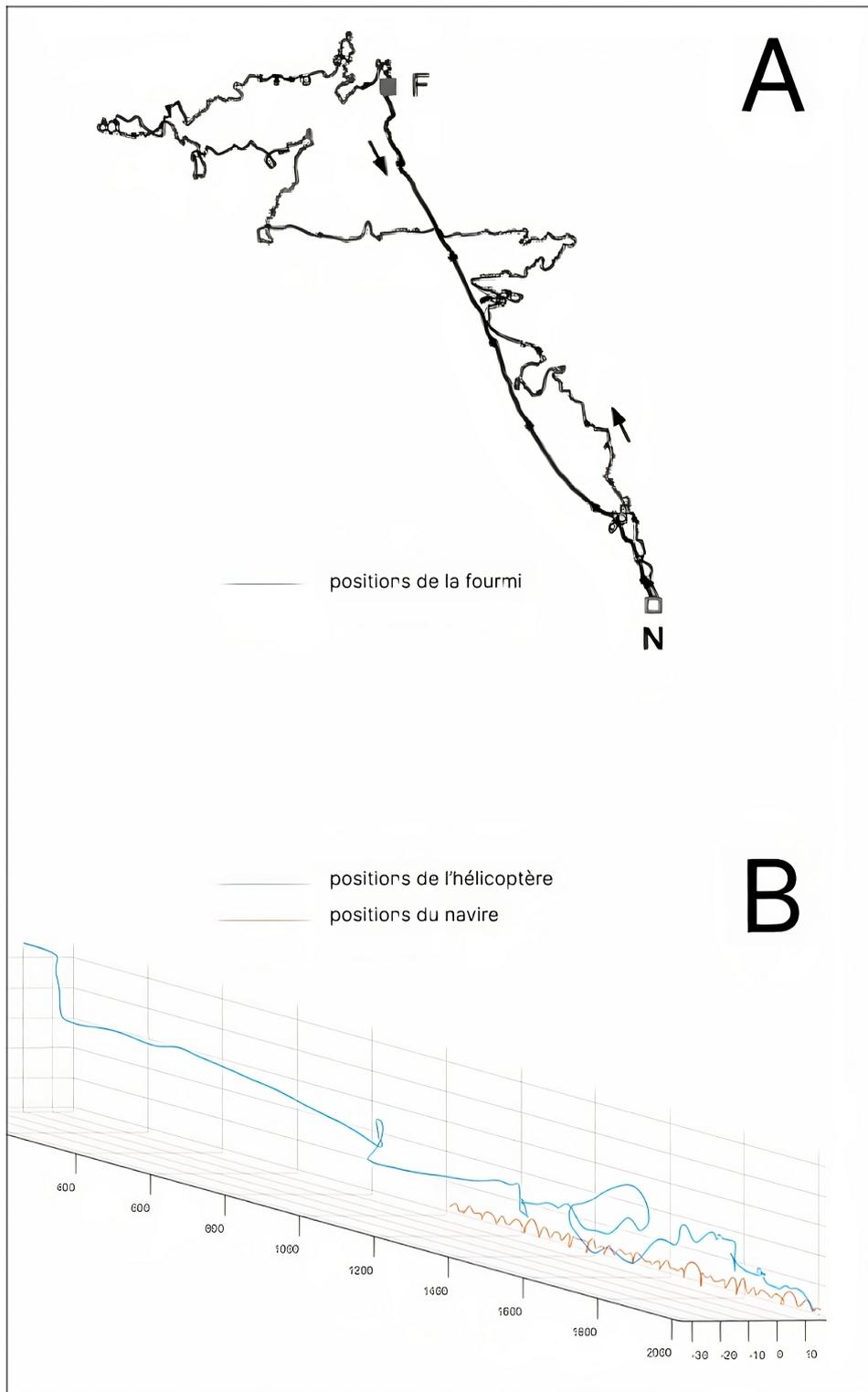


FIGURE 1.1. – Positions (déplacements) d'une fourmi du désert (*Cataglyphis*) dans le sable (A), tiré de WEHNER 2003 et trajectoire d'un hélicoptère à l'appontage, enregistrée sur simulateur de vol par José Márcio Pereira FIGUEIRA, TAGHIZAD et ABID 2017 (B). Les déplacements de la fourmi et de l'hélicoptère sont semblables, d'apparence complexe, constitués de détours abrupts comme l'observait Simon (SIMON 2008).

1. Introduction – 1.4. Les affordances : objets de la perception

Une fois intégrées les contraintes auxquelles la fourmi fait face, les obstacles, le but qu'elle cherche à atteindre, c'est-à-dire une fois que l'espace du problème est convenablement défini, alors la complexité se simplifie (SIMON 2008). En d'autres termes, comprendre l'espace de problème (le domaine de travail) de façon adéquate se fait en incluant ces contraintes, et permet à terme de comprendre la recherche de solution (le comportement) d'un agent évoluant dans cet espace de problème.

En ce qui concerne l'appontage, nous pouvons faire l'hypothèse qu'exprimer le comportement des pilotes dans un repère affordance permettrait d'organiser ces comportements d'apparences complexes et variables, en un modèle cohérent et sensé. Les implications d'un tel modèle seraient vastes et incluraient notamment la possibilité d'identifier et favoriser l'enseignement de stratégies plus ou moins efficaces, ou encore d'anticiper des comportements dangereux par exemple. La figure 1.1 B illustre une trajectoire de vol à l'appontage pour comparaison avec la trajectoire d'une fourmi.

En ce qui concerne la conception d'interface pour des domaines de travaux complexes, tel que le vol d'hélicoptère, les implications sont fortes. Une description précise du problème auquel fait face l'opérateur permet de lui fournir une représentation qui le soutient à la fois dans la détection et la résolution des problèmes complexes auquel il fait face (BENNETT et John M. FLACH 2011). Par exemple, en représentant les contraintes du pilotage d'avion sous forme énergétique Amelink et Flach montrent qu'il est possible d'assister le pilote lors de la phase d'approche de l'atterrissage (Matthijs H J AMELINK 2002; Matthijs H J AMELINK et John M FLACH 2003).

En somme l'important pour l'écologiste c'est donc de comprendre le problème auquel est confronté l'agent / l'opérateur / le pilote en l'exprimant dans le repère adéquate. Ce repère est celui des affordances. En procédant ainsi, l'écologiste répond au premier point du problème du concepteur défini par Vicente et Rasmussen, il décrit la complexité du domaine de travail. Pour le concepteur, cette description servira à déterminer le contenu et la structure de l'assistance (K. VICENTE et J. RASMUSSEN 1992).

En résumé

les affordances sont définies au niveau de la relation A/E (Thomas A STOFFREGEN 2003). Elles sont réelles, dynamiques, propres à l'agent, permettent le contrôle prospectif de l'action, et capturent la réciprocité perception-action. Elles sont un repère approprié pour décrire et comprendre le comportement (actualisation de l'affordance ou exploration de l'affordance) car **elles sont l'unité fondamentale de la perception** (Jeffrey B. WAGMAN et Thomas A. STOFFREGEN 2020). Elles sont une description adéquate pour **faire sens de problèmes complexes**.

.....

1.5. Multiplicité des affordances : l'AH comme outil de description

Les principes EID prônent l'accès aux affordances du domaine de travail (K. VICENTE et J. RASMUSSEN 1992). Cependant, nous l'avons vu précédemment, dans n'importe quelle situation réaliste, il existe à chaque instant et simultanément une multitude d'affordances. Cette multiplicité d'affordances, dont certaines sont imbriquées (*nested*), i.e. spatialement groupées (GAVER 1991), est un challenge supplémentaire pour le concepteur dont l'un des enjeux principaux, rappelons-le, est de formaliser le domaine de travail. Comment alors décrire le domaine de travail? Comment organiser les affordances du domaine de travail en une description cohérente et structurée qui servira de base au design de l'IHM? En effet cette description doit être organisée car elle détermine à son tour la structure de l'IHM (K. VICENTE et J. RASMUSSEN 1992; BENNETT et John M. FLACH 2011). Du côté des sciences du mouvement des formalisations ont été proposées, notamment pour décrire le comportement dans un environnement riche en affordances (MANTEL, HOPPENOT et COLLE 2012). En ce qui concerne la conception d'interface, Vicente et Rasmussen proposent un outil qui permet de structurer les affordances du domaine de travail (Jens RASMUSSEN 1985). Cet outil est la hiérarchie d'abstraction qui est le fruit de l'analyse du domaine de travail (*work domain analysis*) (NAIKAR, HOPCROFT et MOYLAN 2005). Elle se compose de 5 niveaux (bien que 4 soient parfois utilisés), reliés par des liens "moyen-fin". Ces liens moyens-fins sont particulièrement adaptés à la description du domaine de travail dans lequel évoluent des opérateurs orientés vers un but ("*goal-oriented*", Kim J VICENTE et Jens RASMUSSEN 1990), justement car ils permettent de relier les moyens disponibles à des buts recherchés. La figure 1.2, illustre comment de multiples affordances, "jouer", "voler", "coopérer" (*playing, flying, cooperating*) dont certaines sont imbriquées (Voler imbriquée dans Jouer imbriquée dans coopérer) peuvent être représentées par une hiérarchie d'abstraction.

L'affordance au niveau considéré constitue l'entrée dans la hiérarchie, et est toujours le "Quoi". Le niveau supérieur justifie le "Quoi" et capture donc le "Pourquoi". Le niveau inférieur représente le "Comment", c'est-à-dire comment cette action peut être menée à bien. Il s'agit bien de possibilité, la "Locomotion" n'est pas nécessairement réalisée en "Volant", d'autres modes de locomotions sont possibles, qui permettront d'atteindre un point B en partant d'un point A. Cependant la "Locomotion" n'est pas permise par l'affordance relative à l'action de "Lancer". L'agent est donc libre de choisir quel mode de locomotion il souhaite actualiser, bien que ce choix soit contraint. A l'inverse, une affordance peut être imbriquée dans plusieurs affordances à la fois. "Voler" par exemple, peut servir à la fois de "Locomotion" et de "Jeu".

Le lien "Comment-Quoi-Pourquoi" se décale suivant le niveau d'entrée. Pour reprendre l'exemple précédent, la Locomotion est le point d'entrée, le Quoi. Les affordances du niveau supérieur constituent donc nécessairement le Pourquoi, elles

1. Introduction – 1.5. Multiplicité des affordances : l’AH comme outil de description

justifient le Quoi. Pourquoi se déplacer? Dans un but de coopération? ou dans un but d’intimité? Le Comment, "Marcher", "Grimper", "Voler", détermine le moyen d’accomplir le Quoi. Mais par rapport au niveau inférieur, ce Quoi est lui-même un Pourquoi. La locomotion devient alors le Comment et ainsi de suite. Ce lien de moyen-fin permet à des agent orientés vers un but ("*goal-oriented*") de naviguer dans la hiérarchie de telle façon qu’il leur est possible de résoudre des problèmes complexes, en concentrant leur attention sur les composants les plus appropriés du système (Kim J VICENTE et Jens RASMUSSEN 1990). Un agent cherchant à Jouer pour Coopérer n’a pas besoin de focaliser son attention sur les affordances permettant de Marcher ou Ramper. Dans cet exemple simple, on peut déjà voir que l’agent n’a pas besoin de considérer deux des cinq affordances existant au niveau le plus bas, leur actualisation ne servira tout simplement pas son intention actuelle.

Une interface doit permettre l’accès aux affordances du domaine de travail à n’importe quel niveau d’abstraction (K. VICENTE et J. RASMUSSEN 1992) afin d’assurer à l’opérateur un contenu sensé parmi lequel il pourra évoluer afin de trouver les solutions aux problèmes qu’il rencontrera. En effet, une interface dont le contenu est ainsi conçu et structuré relie les buts du système aux ressources à disposition pour les atteindre. Elle permet aux opérateurs de déterminer comment allouer les ressources à disposition pour atteindre leurs objectifs, ou le cas échéant, quels objectifs prioriser si tous ne sont pas atteignables étant données les ressources actuelles. Ainsi l’opérateur est soutenu dans sa prise de décision, même en situation complexe, par une représentation adéquate. Comme le formulent Vicente et Rasmussen "*One way to think of the abstraction hierarchy, then, is as a set of models of the system, each defining a level of the hierarchy.*" (K. VICENTE et J. RASMUSSEN 1992). Ce "set of model" se compose de 5 niveaux décrivant chacun complètement le domaine de travail en en fournissant tout à la fois des aperçus spécifiques. Mais ce sont les relations intra et inter niveaux qui permettent la compréhension complète du domaine de travail (BENNETT et John M. FLACH 2011). Un niveau seul ne suffit pas.

1. Introduction – 1.5. Multiplicité des affordances : l’AH comme outil de description

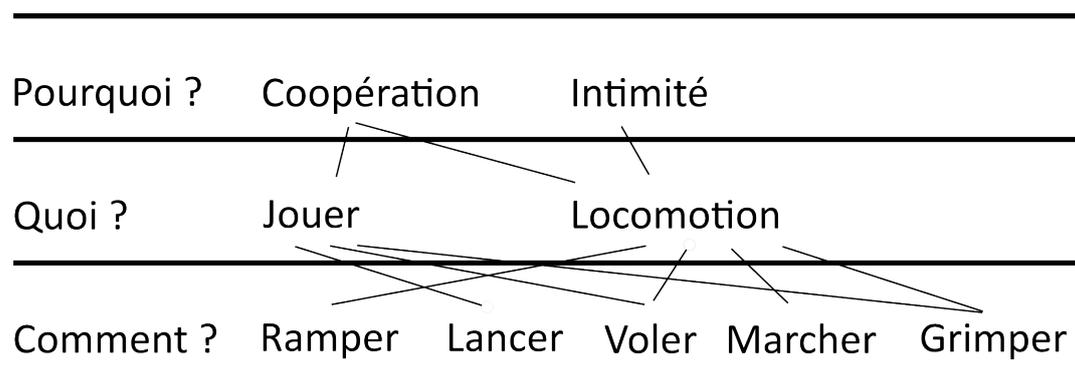


FIGURE 1.2. – Organisation hiérarchique et relation entre de multiples affordances imbriquées. Reproduit d’après Kim J VICENTE et Jens RASMUSSEN 1990

1.5.1. Les cinq niveaux de l’AH

1.5.1.1. But fonctionnel (*functional purpose*)

Le premier niveau décrit les objectifs du système de travail, ce à quoi il doit répondre par rapport à son environnement, ce pour quoi il a été conçu. C’est sa raison d’être. Ce niveau se nomme "but fonctionnel" (*functional purpose*). Une maison par exemple doit assurer la fonction d’abris sans quoi elle ne sera probablement pas occupée (NAIKAR, HOPCROFT et MOYLAN 2005). A ce niveau il s’agit donc de décrire les fonctions que remplit le système considéré vis-à-vis de l’environnement dans lequel il existe, mais également de décrire les contraintes que cet environnement impose sur le fonctionnement du système. Il s’agit donc de décrire la nature de la relation entre le système et l’environnement (NAIKAR, HOPCROFT et MOYLAN 2005). Des exemples d’item à ce niveau incluent la "contribution à la conscience de l’espace de combat" ou encore l’ "interdiction d’utilisation de certaines zones, routes ou possibilités de combats" dans le cas d’un système de surveillance maritime (ELIX et NAIKAR 2020), ou même "aider les forces de défense à répondre vite et efficacement en situation d’alerte" et "assister les contrôleurs aériens dans leur rôle de défense régionale" dans le cas d’un système de détection et de commandement aéroporté (NAIKAR, LINTERN, SANDERSON et al. 2001).

1.5.1.2. Valeurs et priorités (*values and priority measures*)

Ce second niveau, "Valeurs et priorités" (*values and priority measures*), représente les critères qui permettent de déterminer à quel point le système remplit son but fonctionnel (NAIKAR, HOPCROFT et MOYLAN 2005; K. VICENTE, CHRISTOFFERSEN et PEREKLITA 1995; Kim J VICENTE et Jens RASMUSSEN 1990). Pour poursuivre l’exemple précédent d’un système de surveillance maritime, des critères au niveau Valeurs et priorités incluent la "préservation de vie humaine" ou encore la "conservation des ressources". Ces critères servent également à comparer, prioriser et allouer les ressources

1. Introduction – 1.5. Multiplicité des affordances : l'AH comme outil de description

du niveau inférieur "fonctions liées au but" (*purpose related fonction*) de façon à ce que le système remplisse son but fonctionnel. A ce niveau on retrouve souvent des critères en termes abstraits, ne se réfèrent ni au système ni à l'environnement (Jens RASMUSSEN, PEJTERSEN et GOODSTEIN 1994), mais dérivant plutôt de lois naturelles ou sociales, telles que les lois de conservations d'énergies par exemple.

1.5.1.3. Fonctions liées au but (*purpose related functions*)

Le niveau suivant est donc le niveau de fonctions liées au but. Il s'agit à ce niveau de décrire les fonctions qui sont nécessaires à la réalisation des buts fonctionnels. Le "Pilotage" et l' "identification des ennemis" par exemple, sont des fonctions nécessaires pour assurer que le système de surveillance maritime contrôle l'espace de combat (ELIX et NAIKAR 2020). Ce niveau représente quelles utilisations sont faites des éléments physiques et de leurs fonctions au sein du système, dans quelles fonctions ils sont impliqués. En d'autres termes les demandes sur les ressources du système sont exprimées à ce niveau en termes de fonctions à remplir (NAIKAR, HOPCROFT et MOYLAN 2005).

1.5.1.4. Processus liés aux objets (*object related processes*)

Cet avant dernier niveau capture les capacités et les limitations fonctionnelles des éléments physiques et objets du domaine de travail. Il s'agit ici de décrire ce que les éléments physiques et objets du système permettent d'accomplir. Ces capacités et limitations dépendent directement des propriétés des objets auxquels elles sont rattachées et sont ainsi stables, dans le sens où elles ne changent que lorsque les propriétés desdits objets changent. Ainsi la "propulsion" est un exemple de processus liés aux objets, permise par le système de propulsion du système de surveillance maritime (ELIX et NAIKAR 2020).

1.5.1.5. Objets physiques (*physical objects*)

Le niveau le plus bas de la hiérarchie d'abstraction, Objets physiques, est sans doute le moins abstrait des niveaux puisqu'il décrit les éléments physiques du système K. VICENTE et J. RASMUSSEN 1992; NAIKAR, HOPCROFT et MOYLAN 2005. C'est une description des caractéristiques physiques du système et de ses composants lorsque cela est possible et adéquate, ou simplement une liste de ces éléments en cas contraire. Il est ici question des actionneurs, des senseurs, des moteurs et des systèmes de refroidissement par exemple. Dans le cas du système de surveillance maritime, le train d'atterrissage ou encore le système hydraulique sont des exemples d'items de ce niveau (ELIX et NAIKAR 2020). Des caractéristiques de ces objets physiques dépendent les processus qu'ils peuvent remplir, qui déterminent à leur tour les fonctions dans lesquelles ils sont impliqués, qui contraignent les critères de réussites au niveaux Valeurs et priorités et donc *in fine*, l'atteinte des buts fonctionnels du système dans son environnement. L'AH capture ainsi comment des caractéristiques physiques du système sont liés au niveau plus abstrait du but du système. Elle rend également

visible la structure de ces liens, la structure des relations entre items de mêmes ou de différents niveaux. Notons enfin que ces niveaux et le nombre de ces niveaux ne sont pas figés. La philosophie qui a motivé le développement de l'AH visait originellement à décrire le raisonnement des opérateurs, la façon dont ils se représentent leur domaine de travail, comment ils y naviguent en allers-retours permanents entre représentations plus ou moins abstraites afin de résoudre leurs problèmes (NAIKAR, HOPCROFT et MOYLAN 2005). Ainsi l'AH ne comportera que 4 niveaux si le raisonnement des opérateurs suit une abstraction en 4 niveaux.

En résumé

L'AH est un outil de description du domaine de travail. Elle se compose de 5 niveaux reliés par des **liens moyen-fin**. Cette organisation en niveaux de plus en plus abstraits permet d'identifier et de **lier les buts du système à ses ressources**. L'AH est une façon **d'organiser les affordances** du domaine de travail et de déterminer et **structurer le contenu d'une interface**. Comment tirer profit des fortes capacités perceptives humaines pour représenter l'information sur l'interface? Les chapitres suivants couvrent brièvement cette question de la forme de l'interface en abordant les mécanismes perceptifs d'un point de vue écologique. Comment les principes EID prennent en compte ces mécanismes est l'objet de la fin de ce dernier chapitre introductif.

.....

1.6. La forme

L'AH est le résultat du CWA (*cognitive work analysis*) qui se base essentiellement sur des entretiens avec les opérateurs, des experts du domaine (ingénieurs, instructeurs par exemple pour l'aéronautique) de la revue de littérature tels que des manuels de vol par exemple ou des articles scientifiques sur le domaine étudié (NAIKAR, HOPCROFT et MOYLAN 2005). Le contenu de l'interface est donc précisément déterminé lors du CWA mais les principes de conception d'interfaces écologiques formulent également des préconisations quant à la forme des éléments de l'interface. Selon ces principes, l'interface devrait tirer profit des fortes capacités humaines à accéder directement à l'information.

1.6.1. Information disponible (spécificité)

En effet, l'approche écologique de la perception et de l'action stipule que l'information est directement perçue, c'est-à-dire sans la médiation de représentation ou connaissances internes par exemple (James J. GIBSON 2014). L'immédiateté de la perception est possible car l'information est disponible et spécifique. Parce qu'elle est disponible elle est prête à être prélevée (*information pick-up*) par l'agent. Parce

qu'elle est spécifique elle n'est pas le fruit de traitements internes (visant à enrichir une information qui serait appauvrie, à désambiguïser une information qui serait ambiguë). En effet la spécification est une relation unique entre l'information et l'état du système A/E, c'est un mapping 1-1 entre la topologie des affordances et la topologie (structure) des champs d'énergies ambiantes (*ambient arrays*, R. SHAW 1982). En effet ces champs d'énergies ambiantes (au sens où ils environnent l'observateur) sont structurés par l'interaction de l'agent avec son environnement (Thomas A. STOFFREGEN, MANTEL et Benoît G. BARDY 2017; Thomas A. STOFFREGEN et Benoît G. BARDY 2001). C'est-à-dire que la position et les mouvements de l'agent dans son environnement génèrent des variations dans le champ d'énergies ambiantes. De plus ces variations ne sont pas aléatoires mais cohérentes car elles sont contraintes par des lois physiques (lois de la gravité, propagation de la lumière, des ondes etc.). Il en résulte *in fine*, que les structures spatio-temporelles qui émergent dans les champs d'énergies sont spécifiques de l'interaction A/E qui les génèrent, parce qu'elles sont contraintes par des lois physiques et déterminées par les propriétés de la relation A/E. C'est-à-dire qu'il n'existe qu'une seule réalité, qu'un seul état du système A/E qui génèrent une structure donnée dans le champ d'énergies ambiantes. C'est ce champ d'énergies qui stimule les organes perceptifs d'un agent, générant un flux perceptif lui spécifiant sans ambiguïté sa relation au monde. Ce flux perceptif varie au cours du temps, suivant les propriétés et les mouvements de l'observateur et de son environnement, mais il exhibe des propriétés invariantes. Ces propriétés sont des proportions, des constantes spatio-temporelles, c'est ce qui ne varie pas parmi tout ce qui varie, ce sont des invariants (James J. GIBSON 2014).

Un exemple parlant d'invariant spécifiant une information non ambiguë, prête à être prélevée est sans aucun doute le foyer d'expansion. Dès lors qu'un observateur se met en mouvement, se déplace dans une direction, le paysage dans son champ de vision semble se dilater à partir d'un point unique, fonction de la direction dans lequel il se déplace. Ce point unique est le foyer d'expansion, il naît du mouvement de l'observateur qui génère la dilatation du paysage dans son flux optique et est le résultat direct de lois physiques (optiques) contraignant le comportement de la lumière. Le foyer d'expansion spécifie la direction du déplacement au sens où il ne peut pas en être autrement : l'observateur se dirige nécessairement dans la direction du foyer d'expansion. Avancer que la perception peut être directe grâce à l'existence d'invariants dans le flux perceptif n'est pas contradictoire avec le postulat précédemment exposé que les affordances sont l'objet de la perception. Les affordances sont en effet l'objet de la perception, et c'est par la combinaison d'invariants tel que celui évoqué (le foyer d'expansion) que les affordances sont spécifiées dans les champs d'énergie ambiantes et donc perceptibles. Il est d'ailleurs courant dans la littérature écologique de trouver la formulation de l'affordance en termes physiques/cinétiques et en parallèle son développement en tant que combinaison d'invariants. Par exemple l'affordance d'interceptabilité peut être exprimée en fonction de vitesses, distances et positions, et en fonction de variables optiques telles que l'angle de déclinaison ou tau dot (STEINMETZ, LAYTON, POWELL et al. 2020).

L'hypothèse peut donc être faite que ces structures spatio-temporelles (invariants) sont suffisantes pour la perception (Thomas A. STOFFREGEN, MANTEL et Benoît G. BARDY 2017; TURVEY et R. E. SHAW 1999). Ainsi l'information est définie comme une structure spatio-temporelle, une combinaison d'invariants qui spécifient l'état du système A/E (Claire F. MICHAELS et PALATINUS 2010).

1.6.2. D'information disponible à information perçue

L'approche écologique ne se limite pas simplement à une théorie décrivant l'information disponible, elle se propose également d'expliquer comment cette information est prélevée par l'agent. La théorie reconsidère la notion de stimulus en y intégrant la dimension temporelle, introduisant par là-même la notion de flux perceptif et d'organes perceptifs et reconsidérant fondamentalement la notion de sens (sensoriels). Aux récepteurs sensoriels (cônes et bâtonnets pour la vue, corpuscules de Meissner, de Pacini, de Ruffini pour l'haptique par exemple) relayant des indices, des sensations élémentaires au cerveau sous forme de stimulations nerveuses, l'approche oppose la notion de systèmes perceptifs (les yeux, la main par exemple) capables d'accéder à des structures d'ordre supérieur, les invariants, dans le flux perceptif généré par les champs d'énergies ambiants (Thomas A. STOFFREGEN, MANTEL et Benoît G. BARDY 2017; James Jerome GIBSON 1966).

1.6.2.1. Organes perceptifs en tant que smart instruments (la métaphore du smart instrument)

Comment accéder à des variables d'ordre supérieur sans recours à des processus internes? Pour Runeson (RUNESON 1977; Claire F. MICHAELS et PALATINUS 2010) les systèmes perceptifs sont capables d'accéder directement à des variables d'ordre supérieur (e.g les invariants), sans recours à des processus ou des connaissances internes, de la même façon qu'un planimètre peut fournir directement le périmètre de figures (mêmes complexes) sans recourir à des calculs mathématiques. Cette métaphore du planimètre est celle d'un instrument intelligent arrangé de façon à tirer profit des lois, des contraintes physiques pour accéder aux informations d'ordre supérieur (le périmètre). La figure 1.3 présente la composition d'un planimètre. Mesurer le périmètre d'une aire consiste simplement pour le géomètre à parcourir ledit périmètre avec l'index du planimètre. De part l'arrangement des pièces du planimètre, cette action entraînera nécessairement la roue (*measuring roller*) dont la (ou les) révolution sera proportionnelle à la longueur du périmètre. Cette métaphore illustre également un autre point : pour mesurer le périmètre le planimètre doit le parcourir. L'action fait ainsi partie intégrante du processus de perception, ou pour reprendre la formule précédemment introduite, l'action et la perception sont indivisibles car elles se nourrissent réciproquement. Le système perceptif ne se limite donc pas simplement aux sens mais inclue également les effecteurs, nécessaires pour explorer (parcourir le périmètre), c'est-à-dire générer des variations dans le flux perceptif afin de rendre saillant

ce qui ne varie pas parmi tout ce qui varie (les invariants, le périmètre, WITHAGEN et Claire F. MICHAELS 2005; Thomas A. STOFFREGEN, MANTEL et Benoît G. BARDY 2017). La perception est un processus actif (WITHAGEN et Claire F. MICHAELS 2005).

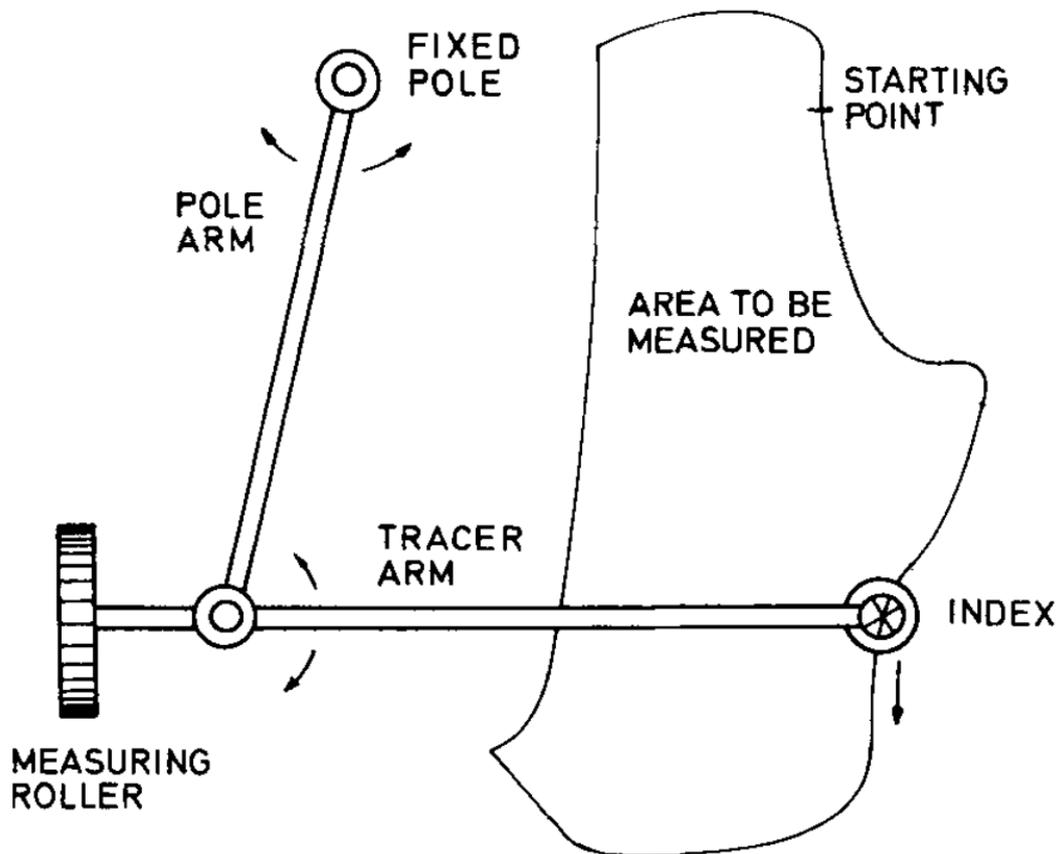


FIGURE 1.3. – Composition d'un planimètre mesurant le périmètre d'une aire (*area to be measured*). D'après RUNESON 1977.

1.6.2.2. Mouvements exploratoires

Le foyer d'expansion est un bon exemple pour mettre en lumière un autre aspect important de la perception : les mouvements exploratoires. Pour les écologistes l'information est prélevée, la perception est un processus actif et non une attente passive de stimulation (James J. GIBSON 2014; Claire F. MICHAELS et PALATINUS 2010; WITHAGEN et Claire F. MICHAELS 2005). Puisque l'invariant apparaît inchangé lorsque tout change, il ne varie pas parmi tout ce qui varie, il est indétectable lorsque rien ne varie. Lorsque rien ne varie, tout est invariant, donc rien ne l'est, il n'y a pas de foyer d'expansion sans déplacement, et ce foyer est d'autant plus saillant que la vitesse de déplacement est importante. De nombreuses études ont mis en évidence l'importance des mouvements exploratoires dans la perception des affordances (Leonard S. MARK 1987; MANTEL, Thomas A. STOFFREGEN, CAMPBELL et al. 2015; CARELLO et Michael T TURVEY 2000;

PAGANO, Paula FITZPATRICK et TURVEY 1993). Ces observations sont cohérentes avec les résultats obtenus dans le cadre du pilotage. Lorsque des pilotes peuvent manipuler l'aéronef, et donc supposément explorer la base informationnelle des affordances en partie déterminées par ses propriétés, leurs performances à l'atterrissage sont améliorées et leur apprentissage est plus rapide (HUET, JACOBS, CAMACHON et al. 2009). Pour le design d'interface cela signifie que l'opérateur peut explorer l'interface, la façon dont les éléments se comportent et ainsi explorer l'affordance du système qu'il pilote (e.g. l'hélicoptère). Notamment, un design autorisant l'exploration peut s'avérer particulièrement utile pour permettre à l'utilisateur de découvrir des propriétés qui sont dynamiques par nature, telles que les vitesses et accélérations (Thomas A. STOFFREGEN et MANTEL 2015).

En résumé

Les **invariants** constituent la **base informationnelle de la perception**. Ce sont des variables spatio-temporelles **structurant le champ d'énergie ambiant** auquel les organes perceptifs sont capables d'accéder, notamment par exploration. Leur combinaison **spécifique** (sans ambiguïté et donc sans inférences) **les affordances** émergent dans le système A/E.

.....

1.7. Objectifs et hypothèses

L'affordance est un concept clef de l'approche écologique qui trouve écho dans la conception d'interfaces écologiques sous la forme des principes EID. L'affordance est l'unité fondamentale selon laquelle un agent perçoit son environnement. Il s'agit d'une mesure fonctionnelle, qui émerge au niveau du système composé par un agent et son environnement. Dans cette mesure elle est particulièrement adaptée à l'étude du comportement en situations complexes tel que l'appontage. Les affordances permettent de se concentrer sur le design du système dans son ensemble, car elles sont par nature des propriétés émergentes au niveau du système. Ainsi, une interface conçue écologiquement devrait permettre de réduire la charge mentale de travail, d'améliorer la conscience de la situation, la détection d'erreurs, et la capacité des opérateurs à résoudre les problèmes auxquels ils sont confrontés. En fin de compte, les effets devraient concerner une amélioration de la sécurité et la performance des pilotes réalisant cette tâche particulièrement sollicitante et dangereuse, pour laquelle le facteur humain est la cause principale d'accidents et incidents.

Dans cette thèse nous tenterons de décrire le domaine de travail d'un hélicoptère à l'appontage et de formaliser l'affordance d'appontabilité afin de 1) comprendre les comportements et stratégies des pilotes à l'appontage et 2) proposer et tester des designs d'assistance à l'appontage. La spécification de l'affordance sera discutée

1. Introduction – 1.7. Objectifs et hypothèses

parmi d'autres perspectives et limites de ce travail de thèse.

2. Analyse du domaine de travail

Sommaire

2.1. Introduction	38
2.2. Méthode	39
2.2.1. Matériel et ressources	39
2.2.2. Entretiens avec les pilotes	41
2.3. Résultats	42
2.3.1. Principes généraux du vol de l'aile	42
2.3.2. Principes du vol d'hélicoptère	43
2.3.3. Le contrôle du vol	44
2.3.3.1. Les commandes	44
2.3.3.2. Effet des commandes sur les niveaux d'énergie	45
2.3.3.3. Indicateurs (instruments de vol)	46
2.3.4. Quelques limites générales de l'hélicoptère	49
2.3.4.1. Diagramme vitesse puissance	49
2.3.4.2. Enveloppe de vol	50
2.3.5. L'hélicoptère en milieu maritime : l'appontage	52
2.3.5.1. Équipage et rôles	53
2.3.6. Environnement maritime	53
2.3.6.1. Océan	53
2.3.6.2. Navire	53
2.3.7. Procédure d'appontage	55
2.3.8. Organisation en AH	56
2.3.8.1. AH 1 conscience de la situation	57
2.3.8.2. AH 2, détails par phases	62
2.4. Discussion	67
2.4.1. Accéder à l'expertise	68
2.4.2. L'appontage une succession d'affordances?	68
2.4.3. Autres phases de CWA	69
2.5. Conclusion	71

2.1. Introduction

En accord avec la méthode EID, ce travail de thèse s'est d'abord focalisé sur l'analyse du domaine de travail du pilotage d'hélicoptère en milieu maritime, en y incluant plus spécialement des aspects relatifs à l'appontage. Le produit de cette première étape a

consisté en plusieurs AH. Nous souhaitons souligner ici que ce processus d'analyse est itératif : analyser et produire une première AH permet de mieux appréhender le domaine de travail étudié, et réciproquement, mieux comprendre le domaine de travail fournit les clefs pour raffiner l'AH. Ce principe fait écho à la notion d' "AH vivante" (*living AH*, BANBURY et TREMBLAY 2004), c'est-à-dire la génération d'une AH qu'il convient de raffiner tout au long du processus de conception et non simplement à ses débuts. Ce premier travail a donc donné naissance à plusieurs AH lesquelles ont évolué tout au long de la thèse, et dont les modifications sont rapportées dans ce manuscrit. Le but, premièrement, est de rendre compte de la formation de notre compréhension du domaine de travail, et puisque cette compréhension s'est opérée progressivement, de donner des bases au lecteur qui ne serait pas familier de l'appontage ou de l'aéronautique. Deuxièmement, chaque AH apporte un focus différent et capture, avec plus ou moins de détails, certains aspect du domaine de travail, qu'il nous semble approprié de reporter ici, dans un souci de précision. Par exemple, la première analyse du domaine de travail que nous avons menée, et donc la première AH générée, portait essentiellement sur les aspects de conscience de la situation et prise d'informations du pilote, mais délaissait l'aspect contrôle, et de ce point de vue était incomplète. Ce n'est que par la suite, lorsque la mécanique de l'hélicoptère est devenue plus claire, notamment lors de la formalisation de l'affordance d'appontabilité, que nous avons su intégrer la dimension du contrôle de l'hélicoptère.

Dans ce chapitre, nous aborderons les principes généraux du vol de l'aile, et la particularité de ces principes dans le cas des voilures tournantes (cas de l'hélicoptère) ainsi que certaines limites pertinentes de l'appareil. Nous approfondirons ensuite le cas de l'hélicoptère en milieu maritime, en détaillant succinctement l'environnement visuel offert par l'océan et le navire ainsi que certaines contraintes spécifiques à cet environnement. Enfin le déroulement d'un appontage type sera détaillé et des limitations spécifiques à l'appontage seront abordées.

2.2. Méthode

2.2.1. Matériel et ressources

La littérature ayant servi de matériel pour l'étude et la description qualitative de l'appontage est reportée à la figure 2.1. Le matériel se compose de manuels théoriques abordant la dynamique du vol en général (e.g. STENGEL 2022), celui de l'hélicoptère en particulier (e.g. Gareth D PADFIELD 2008; DEFENSE UNITED STATES OF AMERICA 2006; *Instrument Flying Handbook (FAA-H-8083-15A)* 2011) et celui de l'hélicoptère à l'appontage plus spécifiquement (e.g. F. A. NASCIMENTO, MAJUMDAR et JARVIS 2012; CARICO et FERRIER 2006; COLLIER 2006). L'organisation de la littérature selon cet axe nous a semblé pertinent pour intégrer des connaissances qui se recoupent selon des principes généraux à d'autres plus spécifiques au milieu maritime. Nous avons pu ainsi bénéficier d'un matériel enrichi par ces études plus générales. Le second

2. Analyse du domaine de travail – 2.2. Méthode

axe selon lequel nous avons organisé nos recherches dans la littérature, est celui présenté à la verticale dans la figure 2.1. Nous intégrons à l'analyse du domaine de travail, des connaissances purement théoriques, traitant de principes physiques, mais également des études centrées sur les pilotes et le facteur humain (e.g. Mica R. ENDSLEY et GARLAND 2000; N. STANTON, CHAMBERS et PIGGOTT 2001; FAA 2003; BAKER, SHANAHAN, HAALAND et al. 2011).

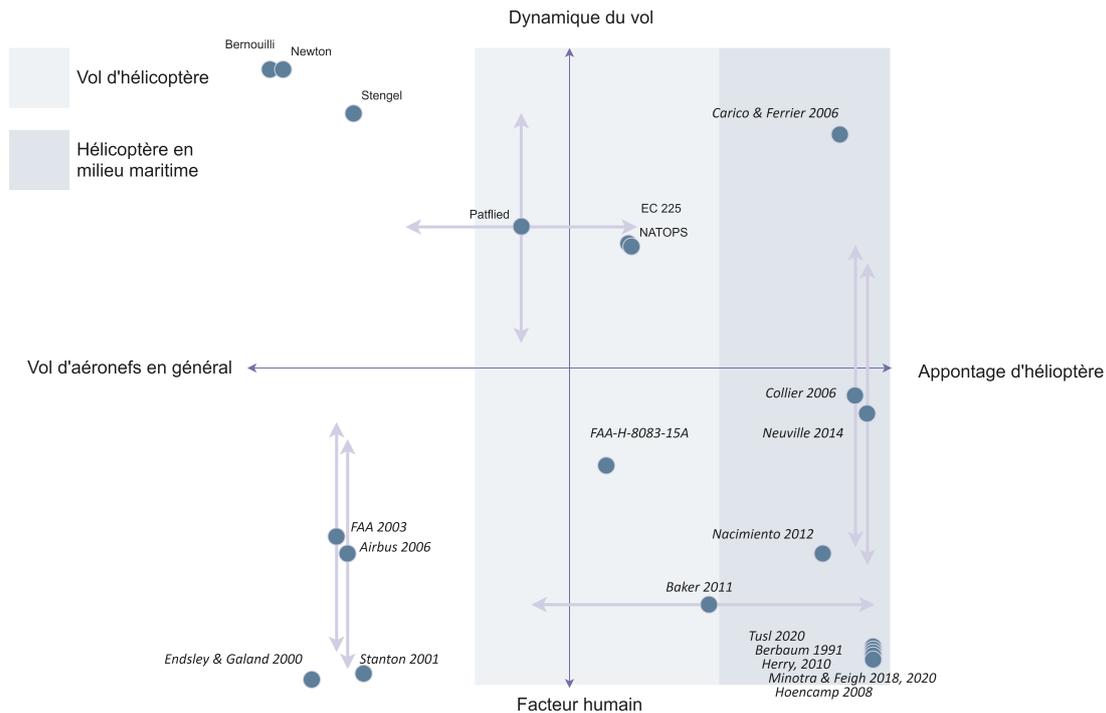


FIGURE 2.1. – Principales ressources bibliographiques utilisées pour l'analyse du domaine de travail.

A noter que ces catégories constituent un continuum plutôt que des cases strictement closes. Les études de Patflied par exemple, traitent d'aspects purement fondamentaux de la dynamique du vol ainsi que de phénomènes appartenant au facteur humain, tel que la caractérisation de lois de contrôle (au sens écologique du terme) et de modèle de pilote, et ne sauraient donc appartenir à une seule case (Gareth D PADFIELD 2008; G. D. PADFIELD 2011). Il en va de même pour les manuels de vol. Les études dans ces différents champs sont nécessaires à la compréhension du domaine de travail, mais quelques études ont été d'un intérêt particulier qui mérite d'être souligné ici.

Trois études majeures ont constitué une base de cette première analyse du domaine de travail et sont détaillées ici ainsi que leurs apports respectifs pour la génération de l'AH numéro 1. Ces études partagent l'intérêt de rapporter, entre autres, une description qualitative de l'activité des pilotes par les pilotes eux-mêmes. Ainsi, Berbaum et

2. Analyse du domaine de travail – 2.2. Méthode

collègues (K.S. BERBAUM, R.S. KENNEDY et HETTINGER 1991) appliquent la méthode de l'analyse de protocole (*protocol analysis*) lors des vols de deux pilotes experts réalisant des appontages sur simulateur. Cette méthode consiste pour le pilote à verbaliser ses comportements cognitifs, perceptifs et ses activités de contrôle (NEWELL, SIMON et al. 1972). L'étude identifie les tâches et les indices visuels requis dans 9 phases successives de l'appontage débutant à une dizaine de kilomètres d'une frégate. La méthode employée par Minotra et Fengh (MINOTRA et Karen M FEIGH 2018) diffère légèrement, bien qu'elle implique la participation de 4 pilotes experts dans le domaine de l'appontage, sur navire léger type frégate. Ces pilotes étaient interviewés de façon plus classique, en suivant un modèle d'entretien adapté de l'ACTA (*applied cognitive task analysis*, MILITELLO et HUTTON 1998). Enfin Herry (HERRY 2010) détaille les informations obtenues lors d'un entretien avec un pilote d'hélicoptère de l'aéronavale et aborde, entre autres, l'activité de l'équipage, les facteurs de difficulté ainsi que les axes d'amélioration. Plus tard l'étude de Tušl et collègues (TUŠL, RAINIERI, FRABONI et al. 2020) s'est ajoutée à ce panel. Dans cette étude 10 pilotes de l'aéronavale italienne étaient interviewés selon la méthode ACTA.

Soulignons enfin quelques critères d'exclusion. Sont exclus de l'analyse les engins type zeppelin ou ballon car leur principe de vol ne repose pas sur le principe de voilure. De même les engins non motorisés tels que les planeurs ou autres Deltas et voiles (parapentes par exemple) sont exclus car la propulsion est un facteur trop différenciant selon nous. Ce point se justifiera plus clairement une fois la dynamique du vol abordée.

2.2.2. Entretiens avec les pilotes

Notre étude du domaine de travail n'aurait été complète sans le retour d'expérience que les pilotes ont accepté de nous partager. Les entretiens que nous avons pu mener sont certainement le matériel le plus riche auquel nous ayons eu accès. Ces entretiens étaient menés de façon semi-directive sur la base des recommandations établies par Naikar (NAIKAR, HOPCROFT et MOYLAN 2005). Le questionnaire sur lequel se sont basés ces entretiens sont également établis d'après les recommandations de Naikar, et sont disponibles en annexe de ce manuscrit.

En tout ce sont 6h d'entretiens avec deux pilotes aguerris, un pilote de l'ALAT (Aviation Légère de l'Armée de Terre) et un pilote de l'aéronavale (BAN d'Hyères). Les deux pilotes sont qualifiés niveau maximal pour l'appontage jour nuit, sur PUMA pour le pilote ALAT et sur de multiples appareils pour le pilote Aéronavale (incluant PUMA et NH90). Spécificité : le pilote ALAT a connu un crash ayant coûté la vie à un membre de l'équipage lors d'un appontage. Le pilote Aéronavale est quant à lui en charge de tester des enveloppes de vol et de réceptionner et valider les nouveaux équipements et hélicoptères (tâche similaire à un pilote d'essai). Ces expériences particulières ont participé, je pense, à la richesse des échanges avec les pilotes, en permettant d'accentuer les enjeux du côté opérationnel.

2.3. Résultats

2.3.1. Principes généraux du vol de l'aile

La figure 2.2 présente le référentiel aéronautique tel qu'il est communément établi. Notez que généralement l'axe verticale est orienté vers la surface terrestre, dans le sens de la gravité. L'appareil (ici un hélicoptère) se déplace en translation et rotation sur les trois dimensions. Ensemble, le roulis (*roll*), le lacet (*yaw*) et le cabrage (*pitch*) définissent l'assiette de l'appareil.

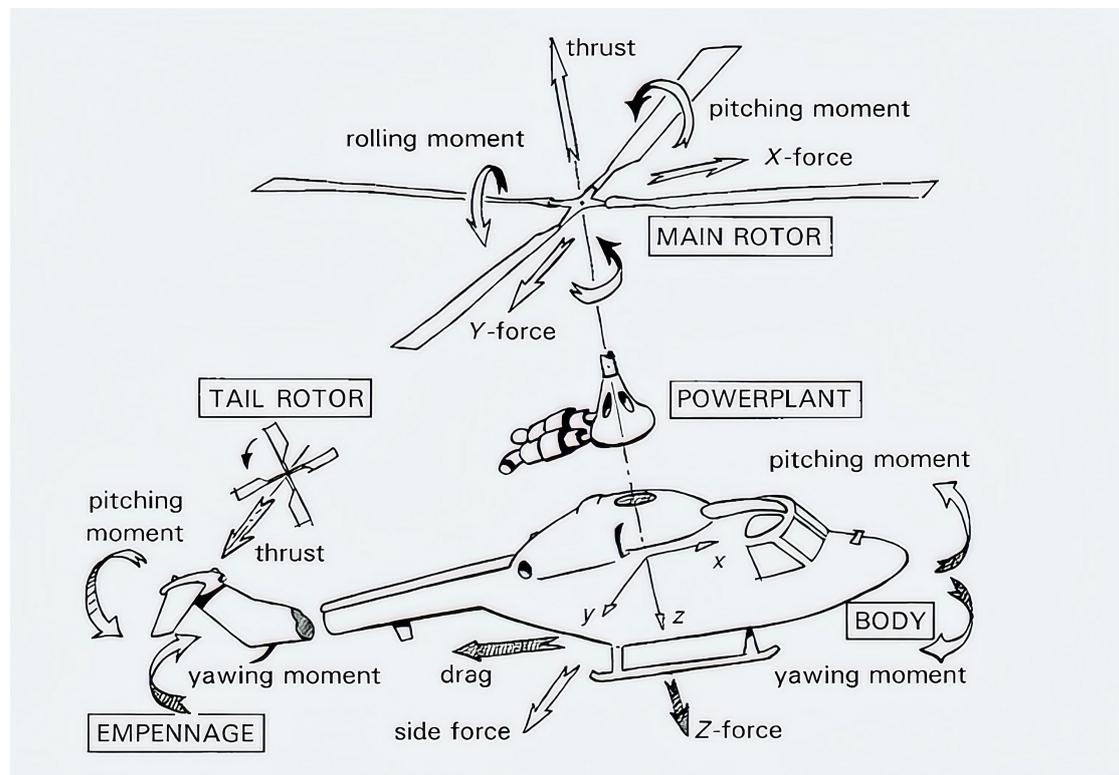


FIGURE 2.2. – Le repère aéronautique est par convention orienté vers le bas. L'hélicoptère est composé d'un moteur (*powerplant*), entraînant un rotor de queue (*tail rotor*) et un rotor principal (*main rotor*) générant une portance (*thrust*). Tiré de Gareth D PADFIELD 2008.

L'aile permet à l'aéronef (avion ou hélicoptère) de produire une force verticale opposée à la gravité terrestre. Cette force s'appelle la portance. La portance est générée par un différentiel de pression entre la face ventrale (l'intrados) et dorsale (l'extrados) de l'aile. Ce différentiel de pression est dû à une différence de vitesses d'écoulement de l'air entre l'intrados et l'extrados. L'air s'écoule plus rapidement sur le bord extrados, générant une dépression, suivant le principe de Bernoulli (HEWITT 2004). Ce jeu de pression dont résulte la portance est dû au profil (forme, géométrie) de l'aile. D'après l'équation 2.1 la portance d'une aile est fonction de la vitesse du vent relatif, de la

densité de l'air, de la surface alaire (aire des ailes projetée dans le plan horizontal) et du coefficient de portance, dépendant lui-même de l'angle d'incidence.

$$R_z = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_z \quad (2.1)$$

Avec R_z la portance, ρ la masse volumique de l'air, V la vitesse du vent relative, S la surface alaire et C_z le coefficient de portance de l'aile.

Au déplacement de l'aile dans la masse d'air s'oppose une résistance, une force de trainée R_d (*drag*) dont l'équation est identique à la portance, à la différence que le coefficient de trainée C_d remplace le coefficient de portance.

$$R_d = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_d \quad (2.2)$$

On peut souligner enfin l'importance de la vitesse du vent relatif dont le carré détermine en grande partie la portance et la trainée. Pour des aéronefs à voilure fixe tels que les avions, le vent relatif est en grande partie déterminé par la vitesse de translation de l'aéronef dans l'axe longitudinal. En effet dans le cas des aéronefs à voilure fixe, la vitesse du vent relatif est la différence entre la vitesse d'avancement de l'aéronef et la vitesse du vent dans le plan terrestre. Pour cette raison le vol stationnaire n'est généralement pas permis pour un avion.

2.3.2. Principes du vol d'hélicoptère

Le principe de vol de l'hélicoptère est le même que celui de l'aéronef à voilure fixe présenté dans la section précédente, à la différence que le vent relatif n'est pas le produit de la translation de l'appareil et donc de l'aile au travers de la masse d'air, mais sa mise en rotation. Ainsi on parle d'aéronef à voilure tournante. Les développements des équations complètes de la dynamique du vol d'hélicoptère sont complexes et ne seront pas abordées en détails dans cette thèse. Pour le moment retenons la description qualitative de la production de la portance et soulignons une conséquence de la mise en rotation du rotor. A cause de la force de réaction à la mise en rotation du rotor principal le couple apparaît. Ce couple est un moment de force qui entraîne le corps de l'appareil (la capsule, *cockpit*) en rotation inverse à la rotation des pâles sur l'axe rotor (axe de lacet). En résulte que la vitesse de rotation des pâles du rotor principal est réduite car une partie de la puissance du moteur la générant est distribuée vers le corps de l'appareil. Pour le dire autrement, la vitesse des pâles dans le référentiel hélicoptère est supérieure à la vitesse des pâles dans la masse d'air. Or c'est cette vitesse dans la masse d'air qui importe dans l'équation de la portance (2.1). D'où l'anti-couple : une partie de la puissance du moteur est distribuée vers le rotor de queue qui génère un moment de force mettant le corps de l'hélicoptère en rotation en sens opposé au couple rotor. On parle donc d'anti-couple. Lorsque cet anti-couple égale le couple du rotor, l'appareil est maintenu sur l'axe de roulis et les vitesses de rotation du rotor dans le repère terrestre et dans le repère hélicoptère sont égales.

2.3.3. Le contrôle du vol

Cette section décrit le lien entre les commandes dont disposent les pilotes, les effecteurs que ces commandes activent et l'effet résultant sur la dynamique de l'hélicoptère. Enfin, pour fermer la boucle, les feedbacks que fournissent les principaux indicateurs de vol seront abordés.

2.3.3.1. Les commandes

Le pilote dispose de trois commandes pour contrôler le vol de l'hélicoptère : la commande de pas collectif, la commande de pas cyclique (latérale et longitudinale) et le palonnier. La commande de pas collectif contrôle l'angle d'incidence des pâles du rotor. Il s'agit d'une commande à un degrés de liberté. Le pilote d'hélicoptère tire sur la commande de pas collectif comme le pilote d'avion tire sur la manette de gaz. En tirant ainsi sur la commande pas collectif, il augmente l'angle d'incidence des pâles et donc la portance du rotor. Ainsi la commande de pas collectif peut être perçue comme le moyen principal de contrôler directement la portance du rotor (Gareth D PADFIELD 2008). A noter que l'angle d'incidence augmentant, la traînée au niveau des pâles du rotor augmente également. Ainsi, pour maintenir la vitesse de rotation du rotor constante (et effectivement générer plus de pousser / portance), le moteur doit fournir plus de puissance au rotor.

La commande de pas cyclique est une commande à deux degrés de liberté. Elle peut varier sur l'axe longitudinal (avant-arrière) et latéral (bâbord – tribord) et prendre n'importe quelle valeur combinant ces deux degrés de liberté. La commande de pas cyclique contrôle l'angle d'incidence des pâles du rotor comme la commande de pas collectif, à la différence que le cyclique applique cette variation localement (Gareth D PADFIELD 2008). Ainsi au cours de sa révolution une pôle se verra plus ou moins inclinée selon la position de la commande de pas cyclique. En résulte un déséquilibre : la poussée du rotor se désaxe selon la position du cyclique. C'est par ce déséquilibre que le pilote est capable de déplacer (translater) l'hélicoptère sur ses axes latéral et longitudinal.

Enfin le palonnier est une commande à un degré de liberté située au niveau des pieds du pilote (pour cela on l'appelle aussi pédale). Le palonnier contrôle la poussée du rotor de queue comme la commande de pas collectif contrôle la poussée du rotor principal (Gareth D PADFIELD 2008). C'est par le palonnier que le pilote contrôle l'anti-couple. C'est donc en partie par le palonnier que le pilote commande le mouvement de lacet de l'appareil. Nous précisons bien en partie, car le mouvement de lacet résulte de la différence entre les moments agissant dans le sens du couple et ceux agissant dans le sens de l'anti-couple. Ainsi pour commander une rotation dans le sens du couple, le pilote peut soit 1) augmenter la poussée du rotor principal en tirant le collectif soit 2) diminuer la poussée du rotor de queue avec le palonnier soit 3) combiner ces deux actions. Cet exemple simple fait déjà apparaître une caractéristique de l'hélicoptère :

rien n'est simple. Les commandes interagissent de sorte que le même déplacement selon un axe peut parfois être produit par plusieurs commandes. Un autre exemple d'interaction des différentes commandes s'illustre lors de la reprise d'altitude à partir du stationnaire. En stationnaire le couple et l'anti-couple s'équilibrent, et la gravité et la portance s'annulent. Lorsque le pilote tire sur le collectif la portance s'accroît et excède l'attraction due à la gravité et l'hélicoptère gagne de l'altitude. Cette même action sur le collectif nous l'avons vu, a pour conséquence d'augmenter le couple du rotor et d'entraîner un mouvement de lacet de la capsule. Pour contrer ce mouvement de lacet le pilote actionne le palonnier et redistribue une partie de la puissance du moteur vers le rotor de queue. L'hélicoptère se stabilise en lacet mais son accélération verticale est contrainte par la réduction de la puissance disponible pour le rotor principal.

2.3.3.2. Effet des commandes sur les niveaux d'énergie

Ce cas d'interaction entre commandes est abordé par Amelink et Flach lors de la conception d'une assistance à l'atterrissage d'avion (Matthijs H J AMELINK et John M FLACH 2003). Les auteurs proposent de modéliser la conséquence de l'action aux commandes sous forme de flux d'énergie, une représentation dont nous pouvons nous inspirer pour capturer la dynamique complexe de l'hélicoptère. La figure 2.3 schématise l'effet des commandes sur les niveaux d'énergie de l'hélicoptère¹. L'énergie provient du moteur qui transforme une énergie stockée (sous forme de kérosène généralement) en énergie mécanique (cf STENGEL 2022, p5 pour plus de détails sur la génération de la propulsion à partir d'énergie stockée). Le débit d'énergie fourni par le moteur, c'est-à-dire la puissance commandée au moteur, est contrôlée par le pilote grâce à la commande de pas collectif (On trouve encore des hélicoptères où le pilote peut contrôler la puissance commandée et le pas collectif séparément, mais dans les hélicoptères modernes cette commande est automatisée / asservie au collectif). Une partie de l'énergie injectée dans le système est convertie en rotation par l'effet de réaction (couple) précédemment décrit et en perte (e.g. frottements, échauffements). Nous traiterons les frottements succinctement lorsque nous aborderons certaines limites de vol. Par l'action sur le palonnier le pilote distribue la puissance restante ($P_{totale} - P_{r+}$) vers le rotor de queue afin de contrer le couple. De la différence entre la puissance générant le couple et celle générant l'anti-couple dépend la rotation de la capsule sur l'axe de lacet. La puissance restante est distribuée entre énergie cinétique et potentielle par l'action du pilote sur la commande de pas cyclique. Ainsi comme pour l'avion, générer de l'énergie potentielle, i.e. gagner de l'altitude, peut s'accomplir en échangeant de l'énergie cinétique (action sur le cyclique) ou redistribuant de l'énergie totale, mécanique (action sur le collectif et palonnier).

1. Le schéma sous forme d'énergie tel qu'il est représenté à la figure 2.3 est approprié au vol d'hélicoptère en régime de vitesses basses et stationnaires (jusqu'à 45 nœuds, Gareth D PADFIELD 2008). En régime de vitesses hautes des effets négligeables en vitesses basses telles que certains frottements et certains moments d'inerties équilibrant notamment le couple sont à prendre en considération.

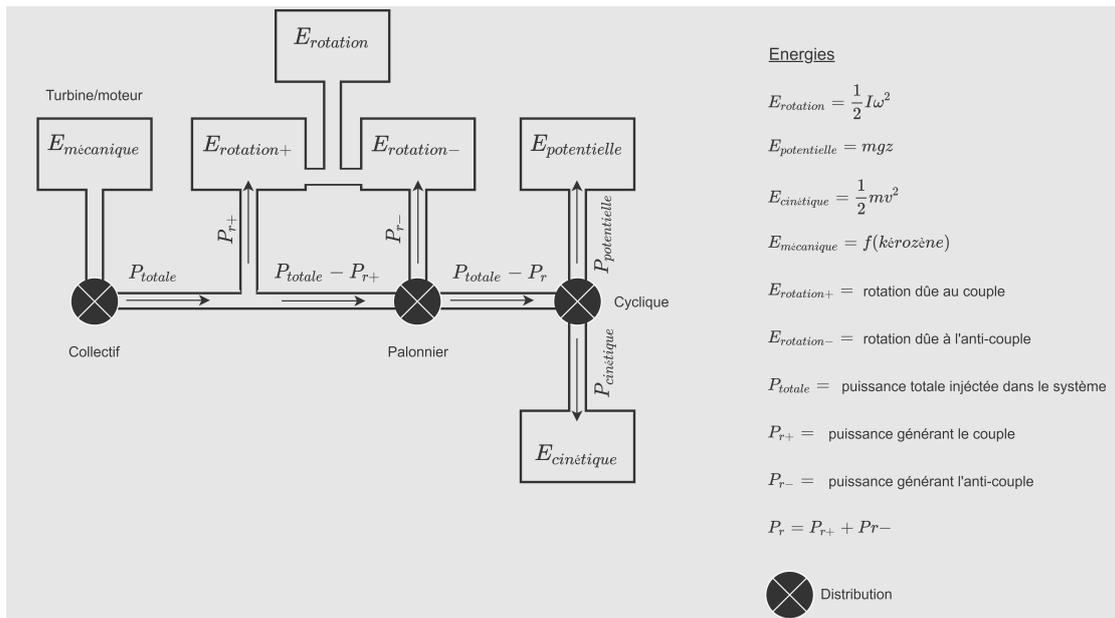


FIGURE 2.3. – Effets des commandes sur les niveaux d'énergies, représentés sous forme de diagramme de flux, inspiré des travaux de Matthijs H J AMELINK et John M FLACH 2003 dans le cadre de l'avion et adapté au cas de l'hélicoptère. La commande de pas collectif contrôle la puissance totale injectée dans le système et fourni par le moteur et entraîne une rotation de la cabine suivant l'axe de lacet. Le palonnier contrôle l'anti-couple qui va contre l'énergie en rotation due au rotor principal. Le collectif enfin, va distribuer l'énergie restante entre énergie potentielle (fonction de l'altitude de l'appareil) et l'énergie cinétique (fonction de la vitesse de déplacement).

2.3.3.3. Indicateurs (instruments de vol)

Enfin, le pilote ne pourrait piloter l'appareil sans les informations que lui fournissent les instruments de vol. Cette section décrit les informations transmises par les instruments standards du cockpit, il ne s'agit en aucun cas d'une liste exhaustive.

Le PFD (*primary flight display*) est un instrument moderne affiché sur écran LCD qui regroupe plusieurs informations issues des six indicateurs principaux : un indicateur de de vitesse air (figure 2.4, A1), un indicateur d'attitude (figure 2.4, B1), un indicateur de cap (figure 2.4, B2), un variomètre (ou indicateur de vitesse verticale, figure 2.4, A2), un altimètre (figure 2.4, A3) et un indicateur de virage et de dérapage (figure 2.4, B3). Ces différents instruments peuvent également se retrouver séparément hors PFD et son représentés dans les figures 2.4. Sur le PFD ils peuvent être complétés par d'autres affichages qui ne seront pas couverts dans cette section (*Manuel de vol EC 225 LP 2004*).

2. Analyse du domaine de travail – 2.3. Résultats

- L'indicateur de vitesse air affiche la vitesse de l'hélicoptère dans la masse d'air environnante. L'unité standard utilisée est le nœud (knot), soit un mille nautique par heure (*Instrument Flying Handbook (FAA-H-8083-15A) 2011*).
- L'indicateur d'attitude ou horizon artificiel, affiche l'assiette de l'hélicoptère par rapport à l'horizon. Le pilote peut donc accéder à des informations relatives à son angle de roulis ou de cabrage. L'unité standard est le degré (*Instrument Flying Handbook (FAA-H-8083-15A) 2011*).
- L'indicateur de cap ou compas indique le cap de l'hélicoptère par rapport au nord magnétique. C'est un instrument de navigation (*Instrument Flying Handbook (FAA-H-8083-15A) 2011*).
- Le variomètre indique la vitesse verticale de l'hélicoptère en mètres par seconde, pieds par minute ou nœuds, selon les pays ou le corps d'armée par exemple (*Instrument Flying Handbook (FAA-H-8083-15A) 2011*).
- L'altimètre indique l'altitude de l'hélicoptère par rapport au niveau de la mer (cas des altimètres fonctionnant sur baromètre) ou par rapport au sol (cas de la hauteur radio-sonde). L'unité de mesure est le mètre ou le pied selon les pays ou corps d'armée (*Instrument Flying Handbook (FAA-H-8083-15A) 2011*).
- L'indicateur de virage et de dérapage affiche l'état de l'hélicoptère selon l'axe longitudinal, plus précisément la relation entre son inclinaison et sa vitesse de rotation selon l'axe de roulis. Ces indications sont utiles pour déterminer si l'aéronef glisse ou dérape pendant un virage (*Instrument Flying Handbook (FAA-H-8083-15A) 2011*).



FIGURE 2.4. – Les 6 indicateurs principaux constituant le PFD indiquent la vitesse air (A1), l’attitude (B1), la vitesse verticale (A2), le cap (B2), l’altitude (A3) et le dérapage (B3). Depuis *Instrument Flying Handbook (FAA-H-8083-15A) 2011*

2.3.4. Quelques limites générales de l'hélicoptère

Cette section aborde quelques contraintes du vol d'hélicoptère qu'il est approprié de connaître car elles sont des contraintes avec lesquelles l'opérateur et donc le concepteur, doivent composer.

2.3.4.1. Diagramme vitesse puissance

Une contrainte de la dynamique de l'hélicoptère est capturée par le diagramme de vitesse puissance présenté à la figure 2.5. Ce graphique illustre bien qu'il existe un régime de vol optimal pour lequel la marge de puissance (puissance disponible – puissance requise) est maximale (généralement autour de 60 nœuds, PROUTY 1995). La puissance requise est requise au sens où elle permet de faire voler l'appareil à la vitesse air voulue. Elle est la somme des puissances requises pour vaincre les frottements et autres pertes et forces de réactions (courbes de puissances parasite, de profil et induite). Il s'agit d'une contrainte importante car le pilote veille à garder une marge de puissance suffisante pour la sécurité du vol (*Manuel de vol EC 225 LP 2004*). C'est en partie cette marge de puissance qui lui permettra de modifier la dynamique de l'appareil, pour regagner de l'altitude et éviter un obstacle par exemple. Ce diagramme capture une des contraintes fortes déterminant les enveloppes de vol des appareils.

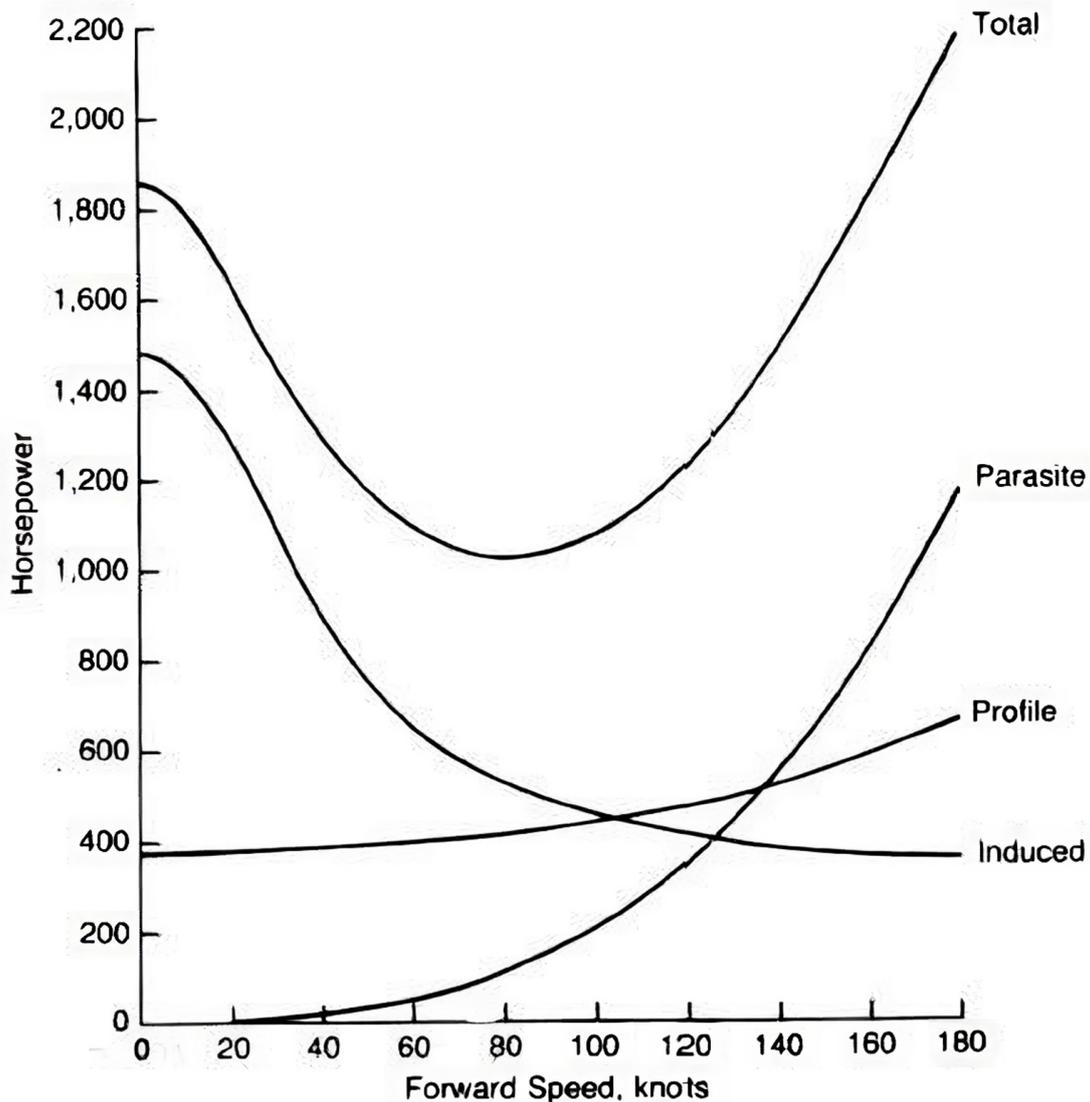


FIGURE 2.5. – Diagramme type de vitesse – puissance d'un hélicoptère. Les puissances induites (*induced*), parasite (*parasite*) et de profil (*profile*) s'additionnent pour former la courbe de puissance totale (*total*) requise pour voler à un régime et une vitesse d'avancement donnée. La forme en U caractéristique de cette courbe indique qu'un régime de vol optimal existe pour lequel la puissance requise est minimale, ici aux alentours de 80 noeuds. Tiré de PROUTY 1995.

2.3.4.2. Enveloppe de vol

L'enveloppe de vol d'un appareil est déterminée en fonction de ses caractéristiques techniques, de ses capacités de vitesse air et facteur de charge ou altitude (Gareth D PADFIELD 2008). Elle représente un espace dans lequel le pilote peut évoluer et au-delà duquel les risques de perte de contrôle ou d'endommagements structurels

sont importants. Dans le cas de l'appontage les SHOLs (*Ship Helicopter Operation Limits*) constituent une enveloppe de vol contraignante. En effet, dans la plupart des marines du monde l'adéquation entre un modèle d'hélicoptère et un modèle de navire particulier est testée lors de campagnes d'essais afin de déterminer des enveloppes de sécurité (RTO 2003). Lors de ces essais c'est l'avis subjectif du pilote d'essai qui sert de métrique. Il évalue au mieux les difficultés qu'éprouveraient la majorité des pilotes dans les conditions qu'il rencontre à un point précis de l'enveloppe de vol (RTO 2003). Ces enveloppes de vol sont généralement déterminées en fonction des mouvements du pont, et de la force et l'orientation du vent par rapport au cap du navire (NEVILLE 2014). Le résultat est présenté sous forme de polar comme l'illustre la figure 2.6. A noter que ces enveloppes sont en grande partie le reflet des contraintes liées à la physique du vol de l'hélicoptère que nous avons abordé précédemment. Par exemple, les limites de l'enveloppe pour un vent de bâbord sont fonctions des limitations du rotor de queue à contrer le couple dans ces conditions (HERRY 2010). De même les limites pour un vent de dos sont fonctions des limites de marge de puissance suivant le diagramme vitesse-puissance (figure 2.5, HERRY 2010). Ce genre d'enveloppe souligne que le pilote ne peut pas simplement évoluer dans son espace de vol comme bon lui semble. Lorsqu'il rejoint le pont d'envol afin d'apponter, le pilote doit respecter les limites exprimées par les SHOLs, pour sa sécurité.

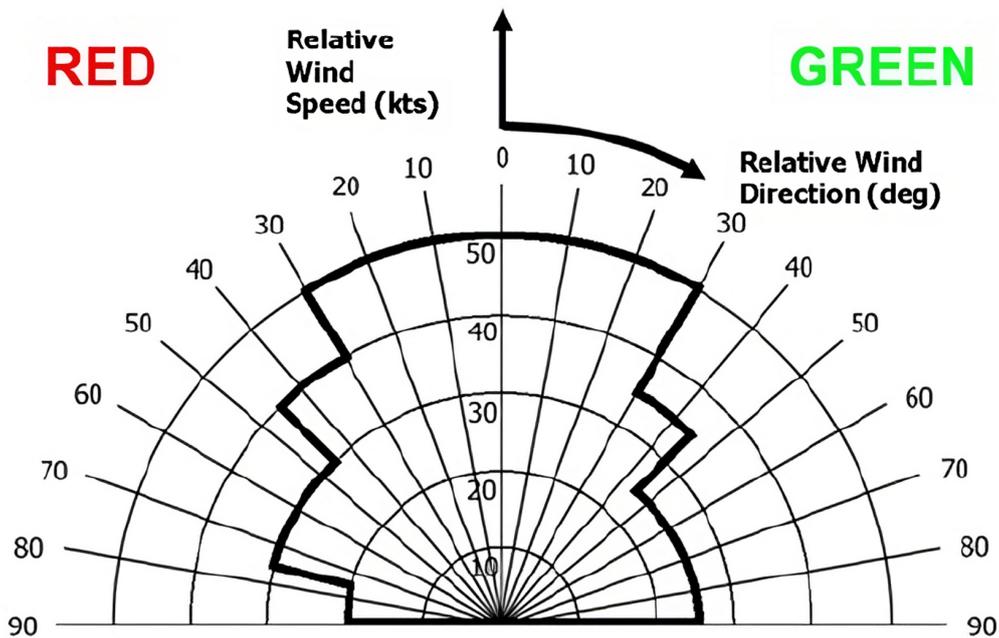


FIGURE 2.6. – SHOLs typique. Le polar indique les limites de vol (lignes noires pleines) en fonction de la vitesse (*Wind Speed*) et de l'intensité (*Wind Direction*) du vent relatif au navire. *Red* : bâbord, *Green*, tribord. On voit que les vents arrière (sous 90 bâbord et tribord) ne permettent pas l'appontage pour ce couple hélicoptère navire précis. Tiré de NEVILLE 2014.

2.3.5. L'hélicoptère en milieu maritime : l'appontage

L'appontage est une manoeuvre consistant à atterrir sur un navire. Nous verrons par la suite qu'il s'agit en réalité d'une séquence de manoeuvres débutant à plusieurs milles nautiques de distance relative au navire. L'appontage peut-être réalisé par des appareils civils (taxis entre yacht par exemple) ou militaires, sur bâtiments plus ou moins lourds (frégate ou BPC² par exemple). Dans cette thèse nous considérons l'appontage dans un contexte militaire comme situation de référence. Plus précisément, nous nous intéressons à l'appontage d'hélicoptères militaires sur bâtiments légers type frégate. En effet, le rôle du couple hélicoptère-frégate au sein de la flotte, notamment le rôle de protection qu'il couvre grâce à ses facultés de lutte anti-sous-marine fait de la disponibilité de l'hélicoptère un enjeu de premier ordre et de l'amélioration de la sécurité de l'appontage une priorité.

2. Le Bâtiment de Projection et de Commandement (BPC) est un bâtiment disposant de plusieurs sites de poser hélicoptère (en général 5) ressemblant à un petit porte avions

2.3.5.1. Équipage et rôles

L'équipage de l'appareil est dépendant du type d'appareil et de la mission. Généralement cet équipage se compose de trois membres, le commandant de bord, le pilote et un troisième opérateur (senco ou technicien navigant sur Lynx, Panther, et Caïman par exemple) mais peut parfois atteindre quatre membres (c'est le cas du Dauphin Pedro qui accueille un plongeur)³. D'après les entretiens que nous avons pu réaliser, le rôle du pilote concerne tout ce qui est relatif au pilotage, c'est-à-dire le maintien de l'aéronef en état de vol sûr. Le rôle du commandant de bord est de seconder le pilote. Il prend le relais en cas de défaillance de ce dernier, et l'assiste essentiellement dans les tâches de navigation et de communication. Le rôle du technicien navigant est plus orienté vers des fonctions de maintenance (en cas de pannes par exemple) ou mécanique (tel que la sortie du train d'atterrissage par exemple). Il est important de souligner que tous les membres de l'équipage jouent un rôle lors de l'appontage. Ainsi par exemple, il n'est pas rare que le technicien navigant fournisse des indications verbales issues de son analyse visuelle en passant la tête à l'extérieur de l'appareil pour scruter le pont du navire. Cela implique notamment des instructions sur la position relative au point de poser ou la distance de séparation entre le train arrière et le bord du navire.

2.3.6. Environnement maritime

2.3.6.1. Océan

L'appontage présente la particularité de se dérouler en milieu maritime. Cette évidence est chargée d'implications (BYE, JOHNSEN et LILLEHAMMER 2018). Premièrement l'environnement en question est pauvre en repères visuels tels que les objets familiers ou les éclairages peuvent l'être lors d'opérations en milieu terrestre. En opération de nuit, l'indisponibilité de repères est d'autant plus impactant pour les pilotes qui déterminent que le facteur jour/nuit est un facteur primordial (HOENCAMP, HOLTEN et PRASAD 2008). De plus, lorsque l'hélicoptère se rapproche du pont d'envol il est exposé à des turbulences dues à un écoulement d'air perturbé par les superstructures du navire (HERRY 2010; HOENCAMP, HOLTEN et PRASAD 2008; NEVILLE 2014) et des projections d'écumes qui peuvent nuire à sa visibilité (HERRY 2010; NEVILLE 2014).

2.3.6.2. Navire

Les caractéristiques du navire sont également à considérer car elles sont déterminantes de l'expérience des pilotes lors de l'appontage. Dans la marine française on distingue des bâtiments lourds, de grande taille tels que les BPC (bâtiment de projection et de commandement) par exemple, et les bâtiments légers tels que les frégates ou les navires à chaland de débarquement (avec généralement un point de poser plus

3. www.defense.gouv.fr

2. Analyse du domaine de travail – 2.3. Résultats

restreint). Selon son tonnage le navire sera plus ou moins exposé à l'effet de la houle et sera donc plus ou moins stable. Dans cette thèse nous nous intéressons au cas de l'appontage sur navires légers type frégate, qui représente le cas le plus exigeant et le plus riche scientifiquement de par son exposition aux aléas de la houle précisément.

Nous rapportons succinctement quelques caractéristiques de ces bâtiments légers. Les dimensions du pont d'envol sont de 14m de large sur 28m de long environ sur frégate de type Lafayette (F 710 - F 714). Ces dimensions déterminent la précision requise à l'appontage (précision requise <2m, HERRY 2010). Ces navires sont équipés d'indicateurs tels que la BRH (barre référence horizon) qui sert de niveau au pilote lui indiquant un point de repère toujours horizontal. L'indicateur de pente de descente (IPL) est également un instrument de pilotage installé sur le navire. Il procure au pilote des informations sur sa pente de descente et l'aide ainsi à suivre un profil de vitesse et d'altitude commandée lors de la phase d'approche. Enfin, le pont d'envol est équipé de plusieurs éclairages et marquages qui servent de points de repère aux pilotes. La ligne d'alignement verticale est utilisée pour aligner le cap de l'hélicoptère avec celui du navire par exemple. Enfin les pilotes sont en contact avec l'équipage du navire par l'intermédiaire de la radio ou visuellement, par signe avec le chien jaune (figure 2.7).



FIGURE 2.7. – Hélicoptère type dauphin livrant du matériel sur la frégate multi-missions Aquitaine. Au premier plan le "chien jaune" guidant le pilote par signe. Depuis <https://www.colsbleus.fr/>

2.3.7. Procédure d'appontage

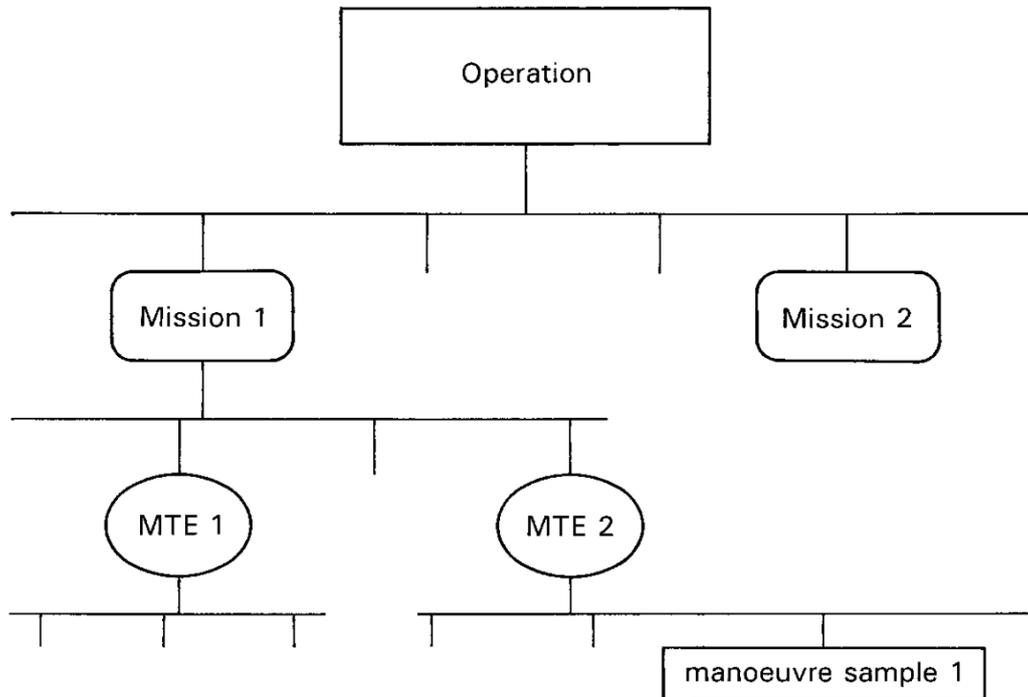


FIGURE 2.8. – Structure d’une opération d’après Gareth D PADFIELD 2008. Une opération (*operation*) se décline en missions (*mission*) composées elles-mêmes de phases élémentaires (*MTE*) constituées de manœuvres (*manoeuvre*).

La figure 2.8 illustre les composants d’une opération. Une opération et une succession de missions composées elles-mêmes de phases élémentaires (*mission task elements*, MTE) qui sont accomplies en réalisant des manœuvres. Ainsi l’appontage est une mission qui s’intègre dans le cadre plus général d’opérations de protection, de SAR (*search and rescue*), de lutte anti-sous-marine ou de surface par exemple⁴. Dans cette thèse notre travail s’est limité à l’appontage car traiter le contexte opérationnel de l’hélicoptère dans son entièreté aurait été bien trop vaste. L’appontage se déroule en plusieurs phases élémentaires dont le nombre varie selon les études (9 selon K.S. BERBAUM, R.S. KENNEDY et HETTINGER 1991, 6 selon TUŠL, RAINIERI, FRABONI et al. 2020, 7 selon MINOTRA et Karen M FEIGH 2018 et MINOTRA et Karen M. FEIGH 2020, 4 selon Herry [si l’on omet les phases vouées au parcage de l’hélicoptère, HERRY 2010], 5 selon José Márcio Pereira FIGUEIRA, TAGHIZAD et ABID 2017). Globalement l’appontage recouvre toujours une phase d’approche pendant laquelle le pilote cherche à se rapprocher du pont en suivant une pente et un profil de vitesse réglementée

4. www.defense.gouv.fr

aboutissant à une phase de stationnaire relatif à proximité du point de poser (cette phase de stationnaire peut être écourtée au point de ne parfois même pas se dérouler, cas de *kiss landing*) et une phase de poser où le pilote "engage le pont" et se pose. La figure 2.9 est reproduite à partir de HERRY 2010, et illustre ces deux grandes phases de 1) vol d'approche et 2) stationnaire et poser ainsi que les objectifs majeurs et les ressources utilisées. Ces objectifs et ressources feront l'objet d'un développement plus rigoureux dans l'AH qui suit.

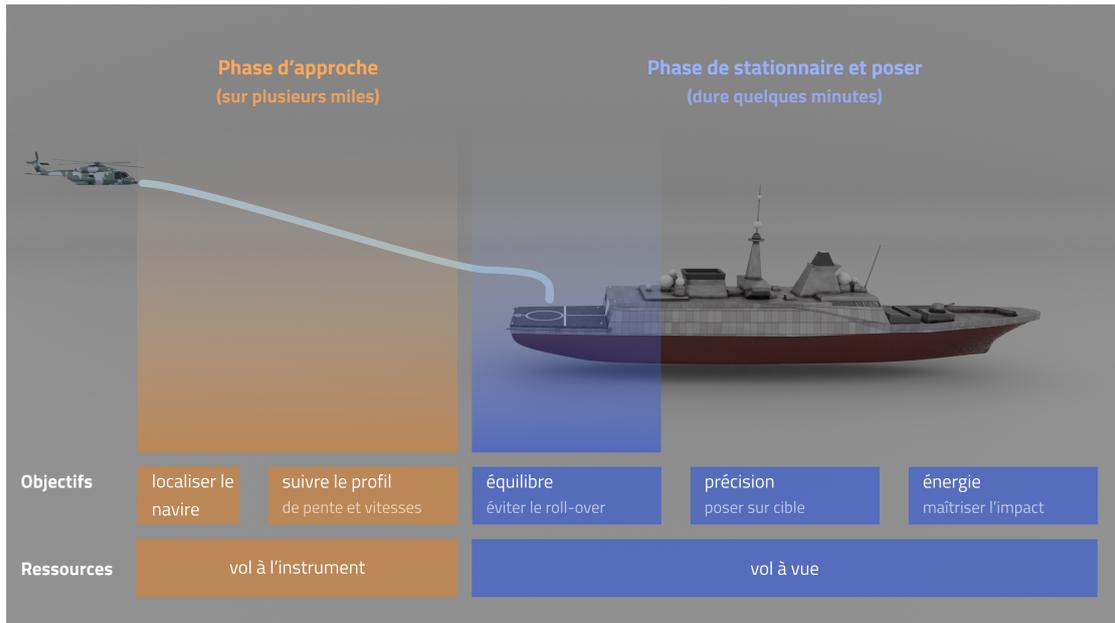


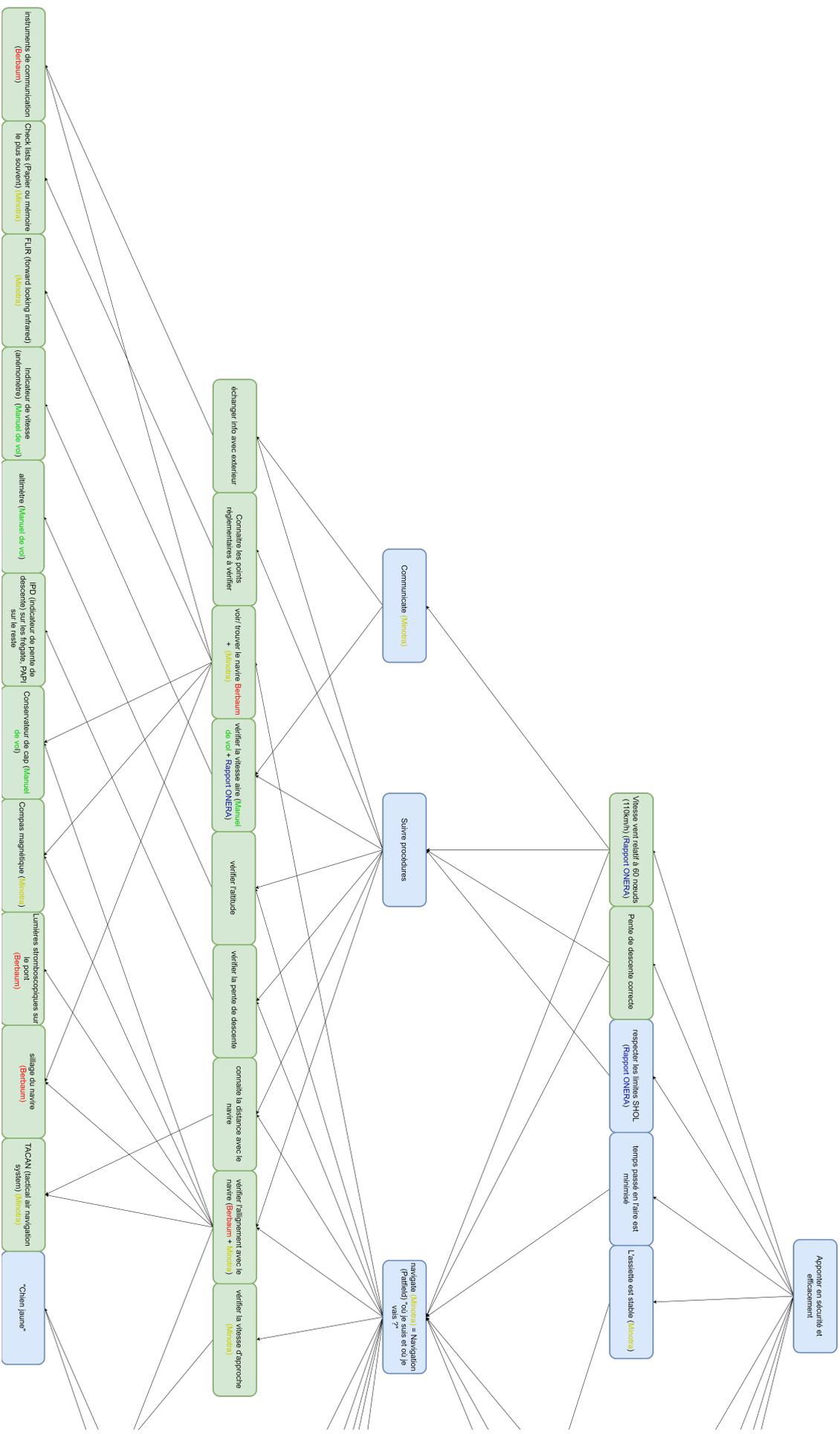
FIGURE 2.9. – Deux grandes phases de l'appontage (reproduites à partir de HERRY 2010). L'approche (gauche - orangée) débute à environ 1,5 milles nautiques du navire et 500 pieds d'altitude. Le pilote suit un profil d'approche commandé, essentiellement par lecture instrumentale. La phase de stationnaire (droite - bleue) se déroule à quelques dizaines de pieds à la verticale du point de poser. Le pilote vole à vue et déclenche le poser lorsqu'il estime les conditions sûres. La trajectoire idéale de l'appareil est projetée en bleu ciel (échelle non représentative).

2.3.8. Organisation en AH

Nous avons introduit des connaissances théoriques essentielles dans la section précédente. Ces connaissances sont le fruit d'une étude patiente et impliquée de domaines théoriques variés, allant de la physique du vol à des contraintes spécifiques à l'environnement et aux manœuvres maritimes. Les AH présentées dans cette section visent à organiser ces connaissances en une description du domaine de travail structurée, liant les buts aux ressources et contraintes qu'offre le système (Jens RASMUSSEN 1985; NAIKAR, HOPCROFT et MOYLAN 2005).

2.3.8.1. AH 1 conscience de la situation

Dans cette première AH, présentée à la figure 2.10 nous avons essayé de nous focaliser essentiellement sur la tâche visuelle des pilotes ; le contrôle à proprement parler, en tant que "maniement de l'hélicoptère" n'est pas abordé. Le terme "contrôler" ne sera donc utilisé qu'au sens de prise d'informations ou de "vérifier" certains paramètres, certains éléments de la situation. Néanmoins la radio a été incluse puisqu'elle permet aux pilotes de communiquer sur un certain nombre de paramètres de vol (qu'ils doivent prélever préalablement). De plus, un certain nombre d'informations prélevées visuellement par des membres de l'équipages autres que le pilote principal transite par la radio.



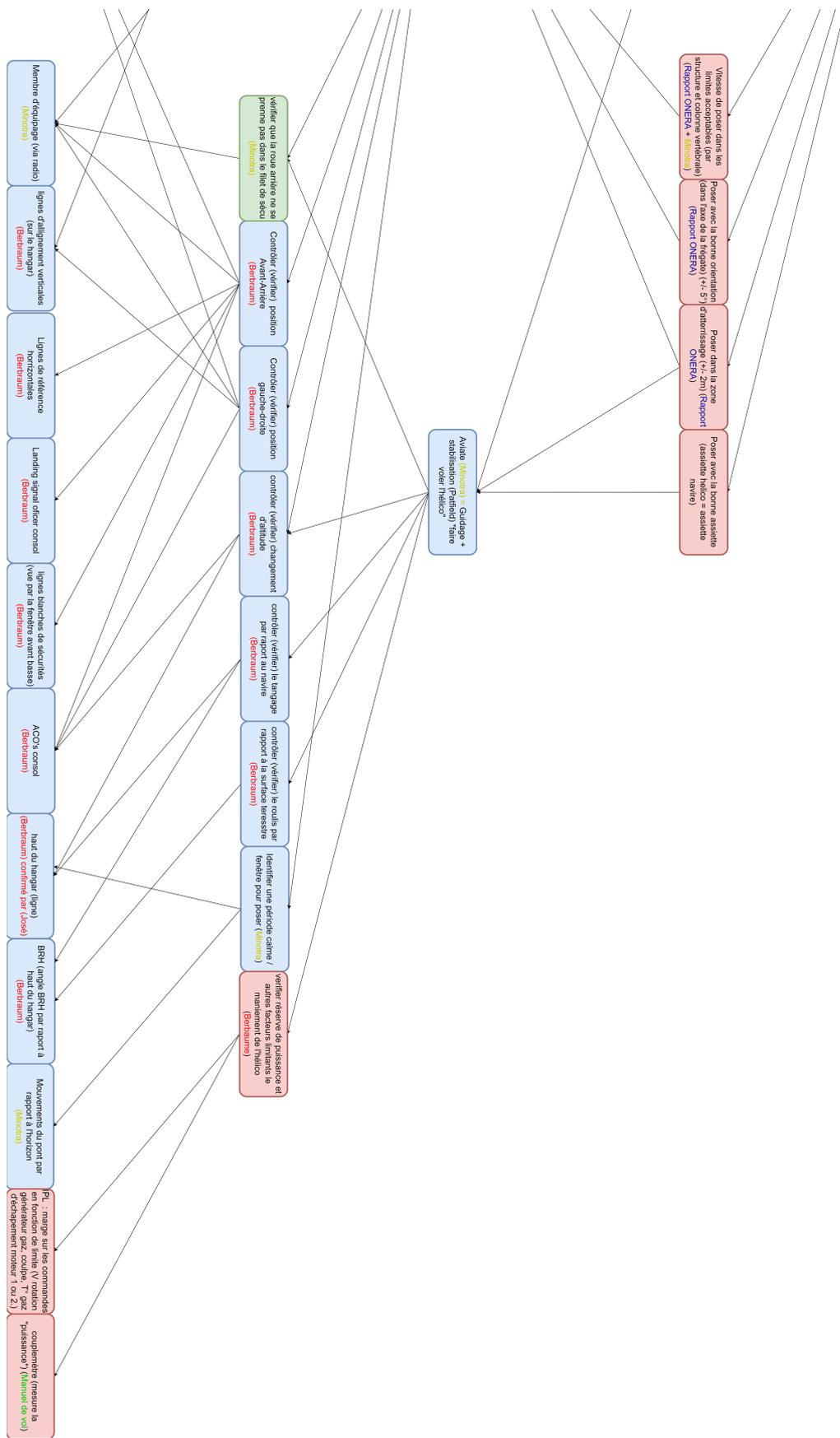


FIGURE 2.10. – Hiérarchie d'abstraction d'un hélicoptère appontant sur navire type frégate, à partir de la phase d'approche jusqu'au poser final. En couleurs les sources principales pour chaque éléments. Conteneurs verts : phase d'approche, bleus, phase de stationnaire et rouge phase de poser.

Étages et fonctions. Les fonctions qui ont été choisies (cf 3ème étage : "communiquer", "respecter les procédures", "aviate" et "navigate") sont susceptibles d'être modifiées après entretien avec les pilotes. En effet, il semble que ce soient des fonctions générales au pilotage qui ne sont peut-être pas appropriées au cas de l'appontage. Remarquons également qu'elles ne correspondent pas aux fonctions proposées par Stanton (Neville A STANTON, Katherine L PLANT, Aaron P ROBERTS et al. 2016a) dans le cas de l'atterrissage (Third party activity, aircraft performance, piloting). De plus Minotra & Feigh (MINOTRA et Karen M FEIGH 2018) rapportent que les pilotes se servent de ces critères pour prioriser les tâches à effectuer : d'abord et avant tout "Aviate", c'est-à-dire "fais voler l'engin", puis "Navigate", "détermine où tu es et où tu vas" et enfin "communicate", "communique aux autres pilotes, aux autres personnes impliquées, préviens des manœuvres à suivre". La volonté de respecter à tout prix les procédures semble être une erreur que commettent certains pilotes, une erreur fatale parfois (MINOTRA et Karen M FEIGH 2018), prioriser selon cette règle est donc une stratégie importante et il pourrait ainsi s'agir en fait, non pas de fonctions (3ème étage) mais de critères de mesure (donc d'éléments appartenant au 4ème étage de l'AH). Ces deux niveaux pourront être intervertis à l'avenir, voir complètement changés, suivant les entretiens avec les pilotes puisqu'il faut avant tout que l'AH représente l'univers mental des pilotes (NAIKAR, HOPCROFT et MOYLAN 2005).

Néanmoins, il est probable que les pilotes doivent répartir leurs ressources cognitives entre ces différentes fonctions suivant des valeurs et des critères de réussite situés au niveau supérieur (4ème étage) ce qui est cohérent avec la description que font Naikar et al. (NAIKAR, HOPCROFT et MOYLAN 2005) de ce niveau de l'AH. Par exemple, si le pilote remarque qu'il ne vole pas à niveau et suit les mouvements de la plateforme en roulis et/ou tangage (indicateur de performance ou mesure de réussite, 4ème étage), il se concentre sur sa stabilisation (partie de "Aviate", 3ème étage) et se sert des repères tels que la BRH (objets physiques, 1er étage) pour vérifier et ajuster son assiette (processus liés aux objets, 2ème étage).

Enfin, les deux premiers étages représentent les ressources à disposition des pilotes pour atteindre leurs objectifs (NAIKAR, HOPCROFT et MOYLAN 2005). On peut ainsi remarquer que certains éléments du premier étage entretiennent beaucoup de liens avec l'étage supérieur. Il s'agit donc d'éléments primordiaux dans la régulation actuelle de la tâche qui peuvent peut-être être "fusionnés" au sein d'une interface, de sorte à limiter les aller et retour entre ces éléments et donc de limiter la charge mentale de travail. Par exemple, les membres de l'équipage (surtout le treuilliste) fournissent des informations permettant de vérifier que 1) la roue arrière ne se prenne pas dans le filet de sécurité quand l'hélicoptère franchit le bord du pont, 2) la vitesse d'approche est correcte, 3) la position avant arrière et 4) gauche droite sont correctes. De ce fait un dispositif permettant de fournir visuellement ces informations au pilote peut rendre la présentation de ces informations plus intuitives. Inversement, le contrôle de l'alignement avec le navire lors de la phase d'approche peut impliquer 6 éléments physiques (TACAN, sillage du navire, lignes d'alignement, lumières stroboscopiques

etc..) qui pourraient être remplacés par un seul élément physique, un seul affichage permettant de contrôler l'alignement.

Structurer par phase. Nous avons souligné dans la section précédente que l'appontage pouvait se diviser en phases successives. Dans l'AH 1 ces différentes phases sont définies par couleur et groupées sur l'axe X. Les éléments de l'AH appartenant à la phase d'approche sont encadrés de vert et groupés à gauche. Au centre et en bleus apparaissent les éléments relatifs à la phase de stationnaire et en rouge à droites sont détaillés les éléments relatifs au poser. L'appontage semble bien se prêter à cette structuration en fonction des phases, structure qui nous semble apporter de la clarté à l'analyse. Cependant cette structure n'est pas fréquente dans l'analyses d'autres domaines de travail, à notre connaissance. Nous discutons ce point plus en détail à la section 2.4.

De l'intérieur vers l'extérieur. Sur l'étage le plus bas, il apparaît que plus l'hélicoptère se rapproche du navire, plus les pilotes scanent l'extérieur, leur environnement, pour réguler leur appontage. Notamment, lorsqu'il s'agit de suivre les procédures, au début de l'appontage, avant la phase de descente, et de localiser le navire, les pilotes utilisent beaucoup leurs instruments (cf étage du bas, gauche, de l'AH). Lors de cette phase de recherche du navire, switcher entre l'intérieur et l'extérieur du cockpit peut engendrer des vertiges (MINOTRA et Karen M FEIGH 2018). Le pilote cherche en effet à établir le visuel sur le navire et s'il ne l'a toujours pas à moins de 0,25 NM (environ 500m) de la position supposée du navire, il abandonne la manœuvre et réessaye (MINOTRA et Karen M FEIGH 2018). Les pilotes dans l'étude de Berbaum et al. (K.S. BERBAUM, R.S. KENNEDY et HETTINGER 1991) reportent qu'à partir de 500m du pont la vitesse d'approche est totalement contrôlée visuellement (en regardant à l'extérieur). La phase de stationnaire est quasiment totalement contrôlée visuellement également (K.S. BERBAUM, R.S. KENNEDY et HETTINGER 1991; MINOTRA et Karen M FEIGH 2018) à l'exception de l'indication de réserve de puissance qui doit être prélevée à l'intérieur du cockpit (K.S. BERBAUM, R.S. KENNEDY et HETTINGER 1991).

Deux tâches à forte charge de travail pour les pilotes. Deux tâches sont sources de fortes charges de travail pour les pilotes d'après ces études. La phase de recherche du navire, comme expliqué plus haut, est reportée comme une phase difficile cognitivement par les pilotes qui doivent en permanence switcher entre leurs instruments et l'environnement (MINOTRA et Karen M FEIGH 2018). L'auteur rapporte à ce propos qu'un affichage tête haute (HUD) serait bénéfique aux pilotes. Enfin, la phase de stationnaire est également une étape de forte charge de travail pour les pilotes (K.S. BERBAUM, R.S. KENNEDY et HETTINGER 1991), puisque les pilotes doivent se baser sur beaucoup d'indices visuels pour maintenir leur position au-dessus du pont. Minotra et Feigh (MINOTRA et Karen M FEIGH 2018) observent que les pilotes moins expérimentés ont tendance à passer plus de temps dans cette phase de stationnaire (parfois jusqu'à 10 min contre environ 30 sec pour les plus chevronnés) puisqu'il s'agit

également ici d'être capable de repérer une fenêtre pour déclencher le poser. Ces résultats concordent avec les conclusions de Nascimiento (F. A. C. NASCIMENTO 2014), qui observe que le risque le plus haut d'accident se situe dans ces phases en vol de nuit, pour des opérations d'hélicoptères en milieu maritime. Ainsi, focaliser notre attention sur ces deux tâches de l'appontage est une priorité pour réduire la charge de travail des pilotes et la performance et la sécurité en général.

2.3.8.2. AH 2, détails par phases

Cette seconde AH a été réalisée après entretiens avec les pilotes. Elle intègre des contraintes liées au contrôle de l'hélicoptère et ne se limite plus simplement aux contraintes portant sur la prise d'information. En ce sens elle est plus complète que l'AH 1. Cependant elle est établie volontairement le plus possible sur les retours des pilotes et peut être biaisée et limitée aux connaissances des pilotes interviewés. En ce sens l'AH 2 peut être considérée comme une façon d'organiser les connaissances acquises par l'entretien, grâce à l'entretien et aux connaissances théoriques acquises lors de la construction de l'AH 1.

Phases élémentaires. La figure 2.11 présente la division de l'appontage en phases élémentaires ainsi que les points de repères déterminant la transition entre les phases d'après le retour des pilotes. Ces phases sont au nombre de 6 et sont cohérentes avec les 6 phases décrites par Tušl dans le cas de la marine italienne (TUŠL, RAINIERI, FRABONI et al. 2020). Dans un souci de simplicité nous déclinons l'analyse pour chacune des phases à partir de l'approche (descente, du point de repère B au point de repère 4) jusqu'au contact avec le pont (point de repère 6).

Ainsi, la figure 2.12 décrit les enjeux et les contraintes majeures lors de la phase d'approche. On peut voir que les pilotes cherchent ici à suivre un profil de pente et de vitesse d'approche, grâce à la lecture instrumentale mais aussi grâce aux informations transmises par le radariste ou l'officier de pont. Lors de cette phase l'hélicoptère est en vol de descente, et le pilote réduit progressivement l'altitude et la vitesse d'approche en agissant sur les trois commandes.

La figure 2.13 présente la phase d'analyse du pont, décrite par le pilote Aéronavale comme la phase où le pilote engage le pont, c'est-à-dire transitionne entre la fin de l'approche et le stationnaire à la verticale du pont. Lors de cette phase le pilote essaie de détecter s'il peut réaliser cette transition en sécurité et établit une stratégie de remise de gaz (de gain d'altitude, *wave-off*) au cas où la situation tournerait mal. Cette étape requière une bonne conscience de la situation et de l'anticipation pour identifier entre autres, la marge de puissance et les opportunités de transitions sûres.

A la suite de cette transition, lorsque le pilote a engagé le pont, il se retrouve à la verticale du point de poser, en stationnaire (figure 2.14). Dès lors il prépare la prise de contact avec le pont en surveillant que la marge de puissance et la précision restent

2. Analyse du domaine de travail – 2.3. Résultats

correctes. Dans cette phase les informations sont presque exclusivement prélevées à l'extérieur du cockpit et le comportement de l'hélicoptère est essentiellement régulé par actions sur la commande de pas collectif (et donc le palonnier pour contrer l'anti-couple).

Lorsque le pilote considère qu'il peut se poser en respectant les contraintes de précision, d'équilibre et d'énergie à l'impact il déclenche et régule le poser (figure 2.15). Dans ce cas les informations sont prélevées à l'extérieur du cockpit, essentiellement visuellement par observation de points de repère sur le hangar et le pont d'envol du navire. Ici le pilote régule le poser presque exclusivement par action sur la commande de pas collectif, en l'abaissant de façon à réduire la portance et accélérer vers le pont. Il s'agit donc bien ici d'accélérer vers le point de poser à partir d'un stationnaire.



FIGURE 2.11. – Phases élémentaires de l'appontage et points de transitions entre ces phases d'après les entretiens avec les pilotes ALAT et Aeronavale.

2. Analyse du domaine de travail – 2.3. Résultats

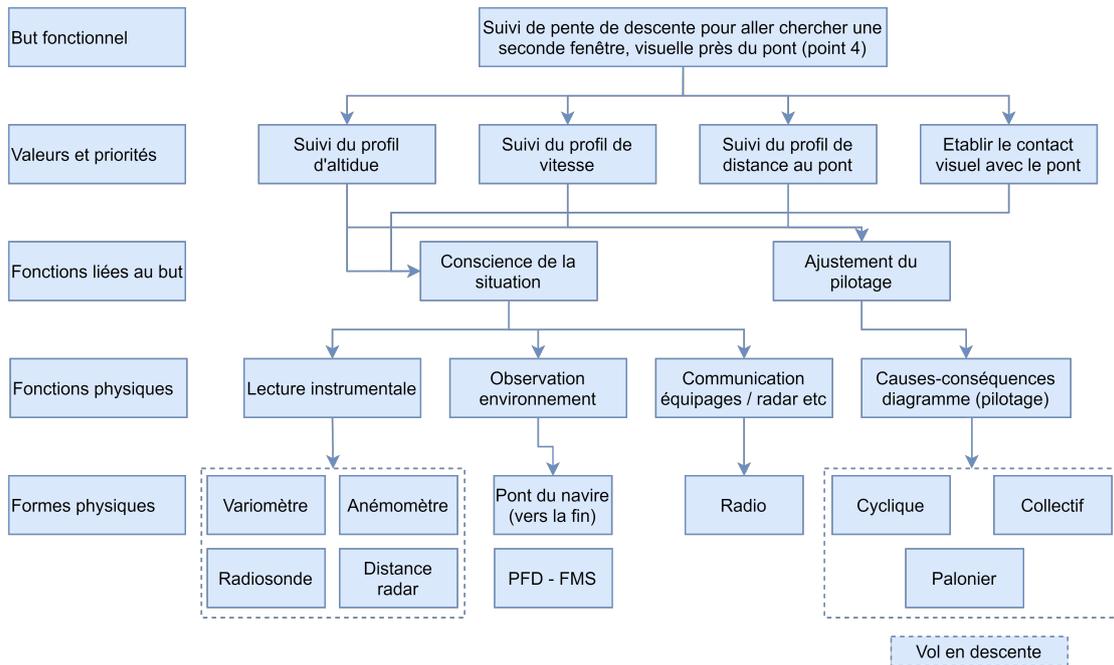


FIGURE 2.12. – AH pour la phase d'approche (point de repère B à 4 sur la figure 2.11), d'après les entretiens pilotes.

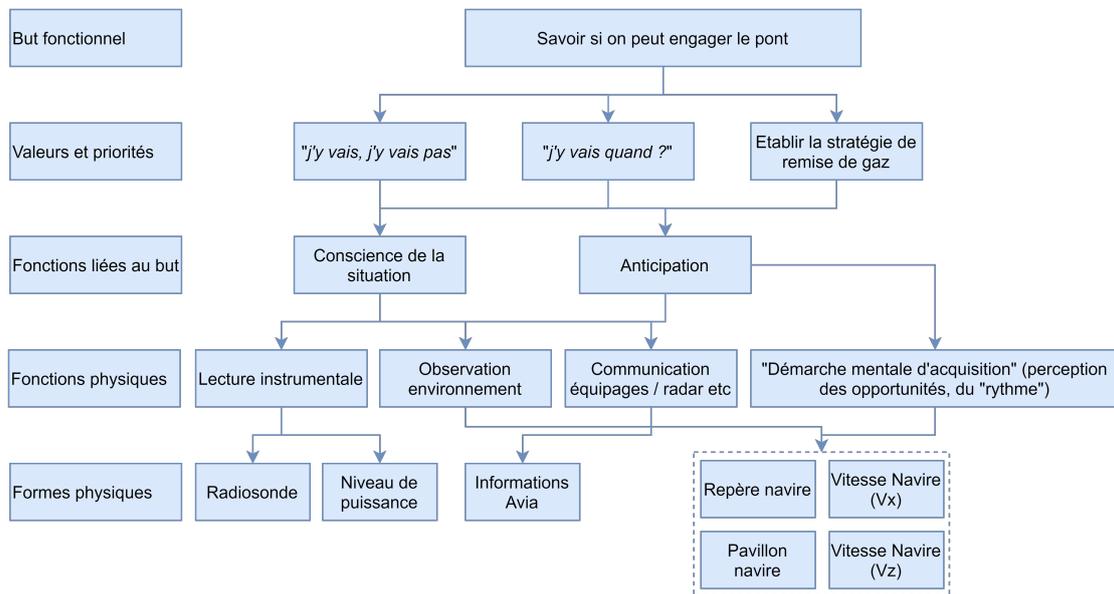


FIGURE 2.13. – AH pour la phase d'analyse du navire (point de repère 4 sur la figure 2.11) d'après les entretiens pilotes.

2. Analyse du domaine de travail – 2.3. Résultats

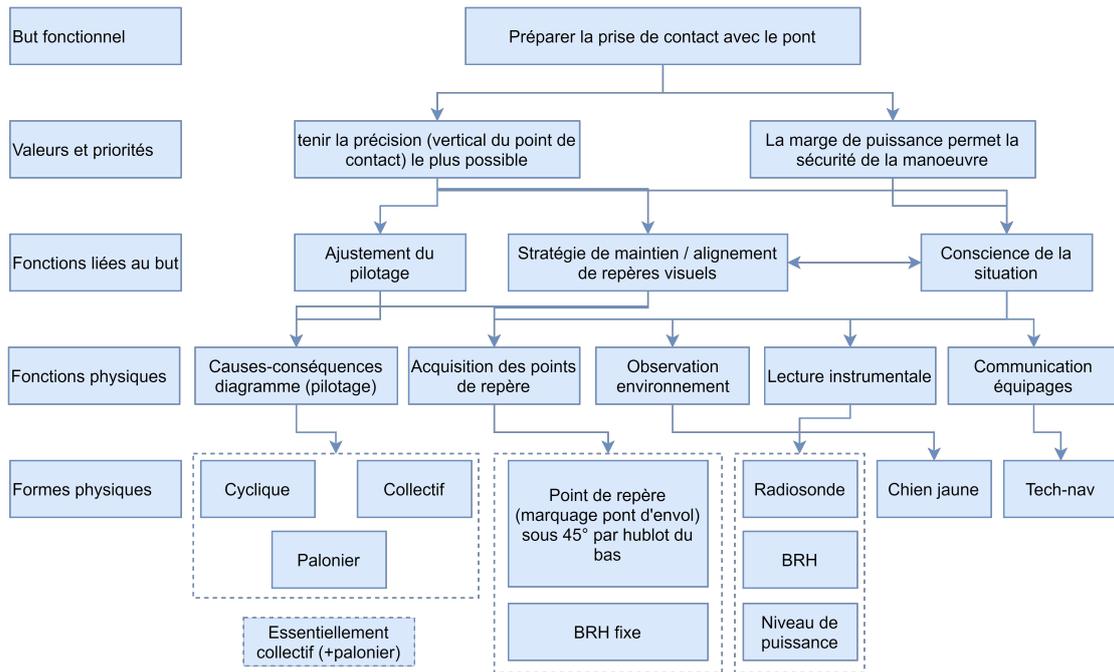


FIGURE 2.14. – AH pour la phase de stationnaire (point de repère 5 sur la figure 2.11) d'après les entretiens pilotes.

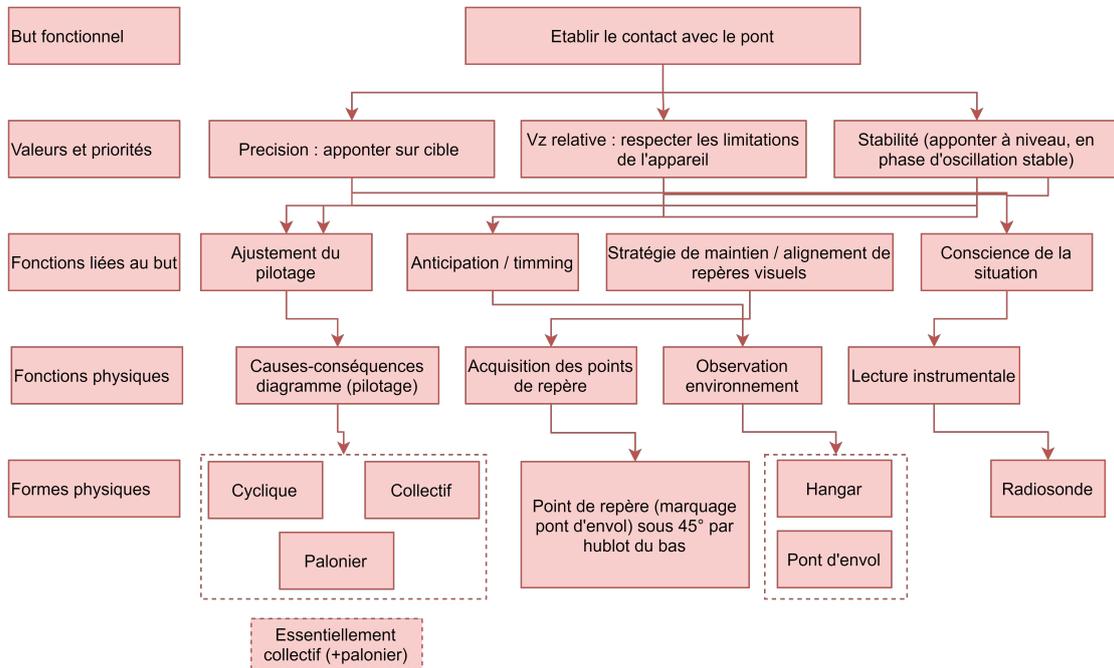


FIGURE 2.15. – AH pour la phase de poser (contact avec le pont, point de repère 6 sur la figure 2.11), d'après les entretiens pilotes.

Points cohérents avec l’AH 1. Cette deuxième AH vient conforter certaines observations réalisées lors de la construction de l’AH 1 (section 2.3.8.1) et conforte donc également la littérature ayant servi de base à cette première AH (figure 2.10). Notamment on observe que l’information nécessaire à la conduite de l’appontage est majoritairement prélevée à l’intérieur du cockpit par lecture instrumentale en début d’approche puis change pour devenir majoritairement prélevée à l’extérieur du cockpit (K.S. BERBAUM, R.S. KENNEDY et HETTINGER 1991 ; MINOTRA et Karen M FEIGH 2018). On retrouve également des objectifs communs aux deux AH, aux niveaux des "buts fonctionnels" et "valeurs et priorités". Ces objectifs sont des objectifs de suivi de profil de vol et de respect de conditions tolérables de stabilité, de vitesse d’impact et de précision.

Découvertes uniques grâce aux entretiens. Le retour de pilotes experts a exposé que le pilote doit être capable de concilier le pilotage, la prise d’information et l’anticipation. Le pilotage se réfère à la faculté de contrôler l’état de l’hélicoptère (vitesses et positions en translation et rotation), ce que capture le diagramme d’énergie présentée à la figure 2.3. La prise d’information s’opère sur des sources variées à l’intérieur du cockpit (lecture instrumentale) et à l’extérieure (observation de l’environnement, de la BRH etc.) et par communication avec les membres d’équipage à bord de l’hélicoptère et du navire. L’anticipation est à l’œuvre lorsque le pilote établit sa stratégie de remise de gaz (wave off) en prévision du cas où elle serait nécessaire par exemple, et elle est souvent déterminante de la sécurité de la manœuvre. On retrouve ici l’intention des pilotes de voler "devant l’aéronef" (*ahead of the aircraft*, RANKIN, WOLTJER, FIELD et al. 2013, voire également SNOWDEN 2007), c’est-à-dire accomplir les manœuvres et les actions à l’avance lorsque c’est possible. C’est cette volonté d’anticiper sur les tâches à venir qui permet aux pilotes d’éviter d’être en crise de temps et d’être prêts pour les situations critiques.

2.4. Discussion

Cette première étape d’analyse qualitative de l’appontage est primordiale pour comprendre les enjeux et les ressources du côté opérationnel. Nous l’avons menée sur la base de matériel bibliographique varié et des entretiens avec deux pilotes expérimentés en appontage. Nous avons construit une première AH à partir du matériel bibliographique. Cette première AH nous a permis de cerner les enjeux de l’appontage, d’acquérir des notions et du vocabulaire qui se sont montrés précieux lors de l’échange avec des pilotes experts. A l’issue de cette série d’entretien avec les pilotes, nous avons construit une seconde AH décrivant plus exhaustivement l’appontage. Je ne pense pas qu’il existe une AH parfaite, qui s’accorde avec la variété des pratiques et des configurations hélicoptère / navire, et donc qu’il est difficile et même utopique d’essayer d’établir une telle AH. La quête de l’exhaustivité est également un piège selon moi qui peut s’avérer un gouffre de temps et d’énergie. Pour cette raison je rejoins les préconisations de Naikar (NAIKAR, HOPCROFT et MOYLAN 2005) quant à la bonne

pratique de définir rigoureusement et préalablement les limites de l'étude du domaine de travail. Dans le cas présent, nous avons restreint cette analyse à partir de la phase d'approche jusqu'au poser. Les phases de ralliement qui précèdent l'approche et de parkage qui succèdent au poser ne sont pas abordées. De même nous avons souhaité traiter principalement de questions de sécurité du vol et n'avons pas abordé d'autres contraintes liées à la furtivité de la manœuvre par exemple. La partie qui suit aborde la difficulté que nous avons éprouvé à accéder aux connaissances nécessaires pour décrire le domaine de travail, et questionne la pertinence d'une analyse du domaine de travail pour l'appontage.

2.4.1. Accéder à l'expertise

La méthode d'analyse du domaine de travail est riche et spécialement adaptée à des systèmes complexes (Kim J VICENTE et Jens RASMUSSEN 1990; K. VICENTE et J. RASMUSSEN 1992). Mais cette méthode est exigeante en termes de ressources car elle implique d'accéder aux connaissances des experts du domaine de travail, c'est-à-dire, dans le cas de l'appontage, des pilotes eux-mêmes, mais également celui des ingénieurs et autres personnes participant à la création du système considéré (MCILROY et Neville A. STANTON 2015; NAIKAR, HOPCROFT et MOYLAN 2005; Kim J VICENTE et Jens RASMUSSEN 1988). C'est une méthode qui, dans une certaine mesure, requière de devenir un expert soi-même (Max MULDER 2016). Un expert regroupant des connaissances sur la dynamique du vol, celle du navire, sur les enjeux d'une mission, la composition et les rôles d'un équipage, l'utilisation des instruments de vol et bien d'autres choses encore. Cependant, nous pouvons parfois faire l'expérience de difficultés pour accéder à la connaissance que partagent ces experts (Matthijs Hendrik Jan AMELINK 2010). Le vocabulaire, la disparité des pratiques, des représentations et des sources, l'étendue des connaissances à regrouper, illustrent certains de ces obstacles à surmonter. Concernant l'appontage, la maîtrise des lois régissant la dynamique du vol et des concepts opérationnels fondamentaux aurait été beaucoup plus difficile à atteindre sans un cadre de thèse propice, encadré par une équipe à l'expertise complémentaire, financée par l'AID et se déroulant à l'ONERA, où la proximité avec les experts a favorisé nombre de discussions formelles et informelles, la possibilité de s'immerger et de prendre en main le système dans son environnement grâce au simulateur de vol, et à faciliter l'accès à des rapports et documents précieux pour enrichir notre bibliographie. Ce cadre de thèse a favorisé à n'en pas douter ma compréhension de l'appontage en particulier et de l'aéronautique en générale.

2.4.2. L'appontage une succession d'affordances ?

La hiérarchie d'abstraction classique se décompose selon deux dimensions. La première, verticale, est la décomposition moyen-fin, où les buts du système sont reliés à ses ressources. La seconde dimension décompose le domaine de travail en constituants de plus en plus petits selon une logique de « tout-partie ». Cette décomposition est appropriée pour des domaines de travail qui, nous l'avons vu en introduction, sont

classiquement décrit comme une imbrication d'affordances, c'est-à-dire des affordances spatialement groupées (GAVER 1991). Ainsi cette dimension « tout – parties » est une dimension spatiale dans son essence. Dans cette thèse nous nous intéressons à un cas bien précis du vol d'hélicoptère, l'appontage. Cette restriction précise implique que nous nous intéressons à une activité (l'appontage) qui, bien qu'elle se déroule dans un domaine de travail précis (l'hélicoptère en environnement maritime), n'est pas un domaine de travail à proprement parler. De plus, cette activité est organisée selon une logique temporelle plus que spatiale, en succession de phases (K.S. BERBAUM, R.S. KENNEDY et HETTINGER 1991; MINOTRA et Karen M FEIGH 2018; TUŠL, RAINIERI, FRABONI et al. 2020; José Márcio Pereira FIGUEIRA, TAGHIZAD et ABID 2017).

Nous questionnons alors la possibilité de représenter une activité grâce à l'AH. Plus précisément, peut-on 1) intégrer des éléments relatifs à l'activité dans la hiérarchie d'abstraction et 2) organiser l'AH selon une logique temporelle? La première question (1) ne semble pas avoir de réponse claire : Rasmussen (Jens RASMUSSEN, PEJTERSEN et GOODSTEIN 1994) semble favorable à ce que l'AH intègre des éléments d'activité tandis que Vicente (Kim J VICENTE 1999) soutient que l'AH doit se limiter à la description des objets de l'action et des liens moyen-fin qu'ils entretiennent (NAIKAR, MOYLAN et PEARCE 2006). Ainsi nous rejoignons Rasmussen lorsque nous intégrons à l'AH des éléments relatifs à l'activité (e.g. « suivre le profil de pente et de vitesses d'approche »).

Concernant la seconde question (2) nous pensons qu'il est pertinent d'organiser l'AH suivant une logique temporelle. En effet, l'appontage est un déroulement de phases élémentaires, répondant ainsi à une organisation plus temporelle que spatiale. Ainsi nous pouvons concevoir l'appontage comme une suite d'affordances temporellement groupées, c'est-à-dire des affordances séquentielles (GAVER 1991). Nous pouvons donc reprendre la décomposition de l'AH selon deux axes, conserver l'axe moyen-fin (axe vertical classique) et remplacer la décomposition selon l'axe « tout-partie » (dimension spatiale) par une décomposition « début-fin » (dimension temporelle). Diviser l'appontage en phases élémentaires selon cet axe temporel nous a permis de rendre compte de la succession d'affordances, du but qu'elles visent à résoudre et des ressources qu'offre le système pour les atteindre. Ces affordances, ces buts et ressources évoluent au cours de l'activité. Par exemple, l'affordance de poser n'est permise qu'après avoir réalisé l'approche et rejoint le pont. De même, certains points de repère soutenant l'actualisation de cette affordance ne sont disponibles qu'une fois à proximité du pont.

2.4.3. Autres phases de CWA

Enfin, est-ce que l'AH est l'outil le plus pertinent pour capturer l'activité? La question se pose car l'approche EID propose d'autres outils pour analyser l'activité. Notamment, lors de la seconde phase, ConTA (*Control Task Analysis*, analyse de la tâche de contrôle) le modèle d'activité contextuelle (*contextual activity template*) est proposé

2. Analyse du domaine de travail – 2.4. Discussion

comme outil pour décrire l'activité en termes relatifs au domaine de travail (Kim J VICENTE 1999). L'application de cet outil dans le cas de l'analyse de l'activité au sein d'un système tactique aérien (*Airborne Early Warning and Control*, AEW&C, NAIKAR, MOYLAN et PEARCE 2006) est présenté à la figure 2.16.

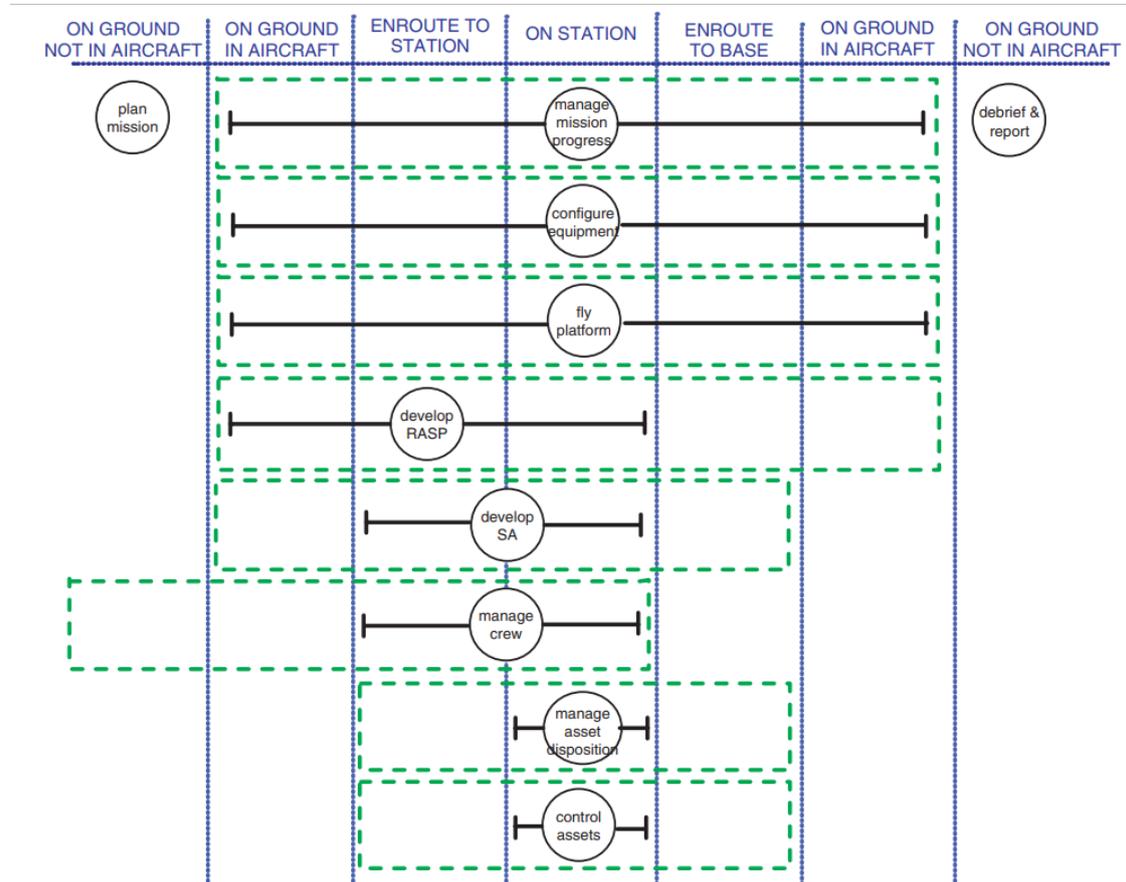


FIGURE 2.16. – Représentation issue de la phase d'analyse de la tâche de contrôle appliquée au système tactique AEW&C, d'après NAIKAR, MOYLAN et PEARCE 2006. En bleu, les situations de travail dans lesquelles sont réalisées des fonctions de travail (cercles).

On peut voir que l'activité est organisée selon les situations et fonctions de travail (*work functions* et *work situations*), ce qui permet ainsi de contextualiser l'activité. Mais si cette représentation capture bien l'activité au regard des situations et fonctions de travail elle ne permet pas l'accès aux relations moyen-fin comme l'AH peut le faire. Ainsi, toutes les étapes du CWA sont complémentaires et apportent chacune un focus unique sur un aspect spécifique de l'activité. Le tableau 2.17 présente ces étapes et objectifs du CWA et souligne cette complémentarité. Nous avons ici conduit la première étape d'un processus d'analyse en comportant cinq. Il convient de compléter l'analyse de l'appontage en menant ces étapes afin d'approfondir et formaliser le

2. Analyse du domaine de travail – 2.5. Conclusion

déroulement de l'activité, les stratégies, l'organisation et la répartition des tâches et les compétences requises pour réaliser cette tâche à haut risque.

Vicente (1999)	Rasmussen <i>et al.</i> (1994)	Types of constraints
Work domain analysis	Work domain analysis	Purposes, priorities and values, general functions and physical resources.
Control task analysis	Activity analysis in work domain terms Activity analysis in decision-making terms	Operating modes (Vicente 1999). Work situations or work functions (Rasmussen <i>et al.</i> 1994). Control tasks (Vicente 1999). Decision-making functions (Rasmussen <i>et al.</i> 1994).
Strategies analysis Social organization and co-operation analysis	Activity analysis in terms of mental strategies Analysis of the work organization	Strategies for making decisions or achieving control tasks. Distribution of work including allocation of work to individuals; organization of individuals into teams; and communication requirements.
Worker competencies analysis	Analysis of system users	Human capabilities and limitations and competencies of workers (e.g. skills, attitudes).

FIGURE 2.17. – Les différentes phases du CWA selon Kim J VICENTE 1999 et Jens RASMUSSEN, PEJTERSEN et GOODSTEIN 1994. Tiré de NAIKAR, MOYLAN et PEARCE 2006. Ensemble ces phases permettent une analyse du domaine de travail, de l'activité et des compétences des travailleurs

2.5. Conclusion

Cette phase longue et passionnante nous a permis de cerner les enjeux de l'appontage. C'est une phase d'étude qualitative qui guide le travail de l'écologiste, qu'il s'agisse d'assister ou de comprendre le comportement. Nous l'avons menée sur la base de matériel bibliographique et des entretiens avec des opérationnels, des pilotes experts. Les résultats obtenues lors de cette première étape suggèrent que l'appontage est une succession de phases ayant chacune leur objectives et contraintes propres. Grâce aux méthodes et outils EID nous avons pu organiser de manière cohérente ces objectifs et contraintes. Fort des connaissances ainsi acquises et organisées, nous pouvons approfondir l'étude de l'appontage. L'étude qui suivi ce travail préliminaire a fait l'objet d'une publication dans l'International Journal of Aerospace Psychology et est reporté dans le chapitre suivant 3. Il s'agit avant tout d'une étude exploratoire visant à identifier de potentiels marqueurs et stratégies dans le comportement de pilotes expert appontant sur frégate légère en environnement virtuel immersif. Le rationnel de cette étude est développé plus en détail dans le chapitre suivant.

3. Stratégie de pilotage

Sommaire

3.1. Objectif scientifique de la 1 ^{ère} <i>expérimentation</i>	72
3.1.1. Affordances séquentielles	72
3.2. Travail de l'équipe / crédits	73
3.3. Articles	73

3.1. Objectif scientifique de la 1^{ère} *expérimentation*

Cette première expérimentation a une visée exploratoire. Elle a bénéficié du travail de José Márcio Pereira Figueira^{1 2}, doctorant à l'ONERA sur la période 2014 - 2017. La qualité des données produites par le travail de José nous a permis d'étudier le comportement de pilotes en situation immersive afin d'identifier des stratégies de pilotage susceptibles de compléter notre analyse du domaine de travail (chapitre 2).

3.1.1. Affordances séquentielles

L'analyse réalisée dans le chapitre précédent (chapitre 2), suggère que la représentation de l'appontage en tant que suite d'affordances séquentiellement (temporellement, GAVER 1991) groupées est pertinent. En effet, lors de l'appontage, le poser n'est permis qu'un fois l'hélicoptère à proximité du pont, c'est-à-dire qu'une fois que l'affordance impliquée dans le suivi du profil d'approche est actualisée. Nous pouvons légitimement nous demander si le comportement des pilotes reflète / confirme une organisation séquentielle des affordances à l'appontage. L'approche écologique repose sur une part conséquente de paradigmes expérimentaux impliquant essentiellement des mesures comportementales. En effet le comportement de l'agent reflète les contraintes physiques et informationnelles avec lesquelles il doit composer pour atteindre son but (William H. WARREN 2006). Dans cette mesure, l'approche distingue les mouvements dit performatoires (ceux consistant à atteindre un but, i.e., à actualiser une affordance donnée) de ceux dit exploratoires (ceux consistant à enrichir / accéder à de l'information spécifiant l'affordance)³. Steinmetz et al. (STEINMETZ,

1. Brazilian Research and Flight Tests Institute
2. ONERA Salon de Provence / DCSD
3. voir la discussion de KILBOURN et ISAKSSON 2007 sur la transition entre mouvements exploratoires et performatoires au cours du temps, avec l'expérience

LAYTON, POWELL et al. 2020) par exemple mesurent la trajectoire de participants en environnement virtuel afin de tester un modèle d'affordance d'interception, et Solomon et Turvey (SOLOMON et Michael T TURVEY 1988) vont jusqu'à proposer que les mouvements exploratoires en dynamique touch⁴ seraient équivalents à la diagonalisation de la matrice du tenseur d'inertie de l'objet exploré (une opération mathématique complexe qui serait ici incarnée (*embodied*) afin de générer de l'information). Ainsi il est possible d'étudier des phénomènes complexes au travers l'étude du comportement, que ce dernier soit exploratoire ou performatoire. Nous explorons dans l'expérience qui suit (chapitre 3) l'hypothèse selon laquelle le comportement des pilotes reflète des contraintes physiques et informationnelles évoluant au cours de la manœuvre d'appontage. Si tel est le cas, il est probable que nous soyons en mesure d'identifier un changement dans le comportement de pilotage (actions aux commandes) en fonction de la phase de vol, que ce comportement soit le résultat de mouvements exploratoires ou performatoires.

3.2. Travail de l'équipe / crédits

José Márcio Pereira Figueira est à l'origine de l'organisation et des passations originales. Sa relecture attentive du manuscrit et les suggestions qui en ont découlé ont contribué significativement à l'amélioration de la qualité de l'article. Franck, Antoine, Thomas et Julien ont tous les quatre participé à la relecture du manuscrit et m'ont suivi et conseillé tout au long de ce premier travail expérimental jusqu'à sa publication. L'expertise de Thomas sur les aspects techniques du simulateur et du contrôle (commande) d'hélicoptère s'est montrée déterminante de la qualité de l'article. Les conseils de Julien sur le choix et l'interprétation des analyses statistiques m'ont permis d'éviter certains écueils de ce côté. Je tiens également à saluer la maîtrise de Franck concernant le processus éditorial, et ses attentes rigoureuses quant à la qualité d'un bon article scientifique, étayé de conseils précis et pertinents. Enfin, l'expertise des théories scientifiques relatives au comportement humain, dont Antoine a fait preuve, est une des raisons principales de l'aboutissement de ce premier travail expérimental. Quant à mon rôle au sein de cette équipe riche et diversifiée, il a été d'établir les hypothèses, déterminer la méthode d'analyse et la conduire, rédiger l'article et mener le processus de publication.

3.3. Articles

Mathieu THOMAS, José M. Pereira FIGUEIRA, Julien R. SERRES et al. « Helicopter Pilots Synchronize Their Altitude with Ship Heave to Minimize Energy When Landing on a

4. Le dynamique touch se réfère à un champ d'étude de la perception haptique (M.T. TURVEY et CARELLO 1995). Le paradigme classique implique une tâche d'estimation de la longueur ou du poids (ou autres propriétés géométriques) d'un bâton que l'on soustrait à la vue du participant (au moyen d'une surface occultante généralement)

3. Stratégie de pilotage – 3.3. Articles

Ship's Deck». In : *The International Journal of Aerospace Psychology* 31.2 (2021). Publisher : Routledge _eprint : <https://doi.org/10.1080/24721840.2020.1862659>, p. 135-148.
DOI : [10.1080/24721840.2020.1862659](https://doi.org/10.1080/24721840.2020.1862659). URL : <https://doi.org/10.1080/24721840.2020.1862659>



Helicopter Pilots Synchronize Their Altitude with Ship Heave to Minimize Energy When Landing on a Ship's Deck

Mathieu Thomas , José M. Pereira Figueira , Julien R Serres , Thomas Rakotomamonjy , Franck Ruffier & Antoine HP Morice

To cite this article: Mathieu Thomas , José M. Pereira Figueira , Julien R Serres , Thomas Rakotomamonjy , Franck Ruffier & Antoine HP Morice (2021): Helicopter Pilots Synchronize Their Altitude with Ship Heave to Minimize Energy When Landing on a Ship's Deck, The International Journal of Aerospace Psychology, DOI: [10.1080/24721840.2020.1862659](https://doi.org/10.1080/24721840.2020.1862659)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/24721840.2020.1862659>

 View supplementary material [↗](#)

 Published online: 05 Feb 2021.

 Submit your article to this journal [↗](#)

 View related articles [↗](#)

 View Crossmark data [↗](#)

NOTE



Helicopter Pilots Synchronize Their Altitude with Ship Heave to Minimize Energy When Landing on a Ship's Deck

Mathieu Thomas^{a,b}, José M. Pereira Figueira^c, Julien R Serres^b, Thomas Rakotomamonjy^a, Franck Ruffier^b, and Antoine HP Morice^b

^aDTIS, ONERA, Salon-de-Provence, France; ^bAix Marseille Univ, CNRS, ISM, Marseille, France; ^cLt Col Eng Divisão de Ensaios em Voo – EEV (Flight Test Division) Instituto de Pesquisas e Ensaios em Voo – IPEV (Flight Tests and Research Institute) Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial – DCTA (Department of Science and Aerospace Technology), Força Aérea Brasileira (Brazilian Air Force), São José Dos Campos, Brazil

ABSTRACT

Objective: This study aims at investigating helicopter pilots' strategies to achieve ship deck landing.

Background: Helicopter maritime operations are challenging, especially when it comes to landing on the moving decks of small ships, such as frigates, which can lead to dramatic accidents.

Method: Expert pilots were requested to fly the full ship landing maneuver from approach to touchdown in an immersive simulator. Two sea states (3 and 4 on the Douglas Sea scale) and their resulting deck movements were used. Changes in helicopter altitude were correlated with deck heave movements throughout the maneuvers in order to scrutinize the helicopter-deck coupling. The energy at impact was measured.

Results: The dynamics of helicopter-deck coupling evolved through two phases during the maneuver: Initially, no coupling then, coupling in phase between the helicopter vertical displacements and deck heave displacements. Moreover, the coupling reached higher values within the last 15 m to landing, corresponding to a hover phase and touchdown, and the correlation increased with sea level. This coupling might help in improving pilots' safety since the greater the coupling at touchdown, the lesser the kinetic energy at impact.

Conclusion: Coupling the helicopter vertical displacements with ship heave movements seems to be an efficient strategy to minimize energy at impact. Questions arise on both the rationale and the perceptual invariant behind such behavior and indicate the necessity of further investigation.

Introduction

Landing maneuvers in aeronautics have been extensively studied to understand the nature of the perceptual-motor mechanism used by pilots. Studies have focused on the candidate information usable to visually control the landing maneuver (Galanis et al., 1998) or on the effect of expertise in information pickup (Jacobs et al., 2018). Overall, these studies report a strong visual-motor coupling between the plane's pilots and the runway. However, the question of whether such a perceptual-motor coupling also applies when landing

CONTACT Mathieu Thomas  thomas.mathieu.14@gmail.com; mathieu.thomas@onera.fr  DTIS, ONERA, FR-13661 Salon Cedex Air, Palaiseau.

 Supplemental data for this article can be accessed on the [publisher's website](#).

© 2021 Taylor & Francis Group, LLC

a helicopter on a ship's deck remains open. Indeed, helicopter deck landing mainly differs from traditional landing maneuvers with planes on a runway because the ship is sailing on the sea and, more importantly, because its deck is oscillating with the swell. Therefore, the movement of the deck can substantially increase the difficulty of the final approach. Indeed, ship landing becomes particularly challenging for helicopter pilots in high sea states. Substantial efforts aiming at enhancing safety and success during ship helicopter landing are led around the world using realistic simulation tools (e.g., JSHIP programme on the NASA Ames Vertical Simulator (VMS), QinetiQ lab activities (formerly DERA) with the Advanced Flight Simulator (AFS)) which proved to be efficient and cost-effective solutions as compared to field studies, especially in Ship-Helicopter Operating Limits (SHOLs) evaluation.

This experiment aims to demonstrate the perceptual nature of helicopter pilots' behavior. A particular point of interest was whether pilots monitored their helicopter's altitude visually so as to couple it with the heave movement of the ship's deck. To explore this, expert helicopter pilots were instructed to land on a ship's deck in virtual reality, wherein the sea state, resulting in realistic deck movements, was selected. The analyses had two successive goals. The first goal aims at identifying whether pilots were perceptually coupled with the heave movement of the ship's deck, by analyzing the correlation between the helicopter's and the deck's altitude during the maneuver. Moreover, since the safety of the landing maneuver relies in part on the minimization of the energy at impact to prevent structural damage on the helicopter and avoid pilots' spinal traumas (Desjardins et al., 1989), the second goal aims at investigating the relationship between the strength of the perceptual coupling at touchdown and the energy at impact.

Method

We analyzed data originally collected to build a human-inspired automatic control model of a helicopter during a simulated ship landing task (Figueira et al., 2015). The motivation for the present article arose when hypothesizing on the role played by ship deck heave on the pilots' behavior. The present manuscript thus focuses on the perceptual basis of pilots' behavior rather than on suitable models to predict it.

Participants

Four experienced operational pilots from the Brazilian Armed Forces participated in the data collection. They had different backgrounds concerning the type of aircraft and operational missions accomplished. Two of them had extensive experience in real maritime environments, while the two others had no prior ship landing experience as shown in Table 2. None of them reported significant experience of ship landing maneuvers in flight simulators.

Experimental Setup

The experiment was run in an immersive fixed-base rotorcraft simulator. Participants sat in the right (pilot) seat of a helicopter cockpit inside a cave simulator composed of three large vertical screens (3.16 m wide \times 2.37 m height) perpendicularly arranged and a large

horizontal screen, which encompassed 265° of their horizontal and 135° of their vertical fields of view. The virtual scene was projected onto the screens using four identical DLP video-projectors (W1080ST+, BenQ™ Taipei, Taiwan) each having a resolution of 1920 × 1080 pixels and a frame rate of 60 Hz. Participants handled usual helicopter commands: the cyclic stick with their right hand and the collective stick with their left hand and the pedals were used to control the yaw. Physical occlusions were placed in the lower half of the setup, on the cockpit monitors, to restrict the pilots' field of view similarly to the occlusion created by the cockpit of a heavy helicopter as illustrated in Figure 1.

Virtual Environment

The virtual world comprised a skydome above an infinite sea surface animated with realistic and configurable wave motions. A 3D ship model (*Lafayette class* frigate, 3,000 tons) was animated along the 6 degrees of freedom according to the roughness of the sea, wind force and direction according to a frequential model called Response Amplitude Operator (Journée & Massie, 2001; Techet, 2005), built from experimental at-sea measurements of the deck movement of the Lafayette Class frigate and provided by Naval Group. Finally, the simulator reproduced in real time with great detail the flight dynamics of an 11-ton cargo class rotorcraft through the highly realistic Helicopter Overall Simulation Code (Benoit et al., 2000), including detailed models for the various parts of the helicopter (rotor, blades, fuselage) as well as the interactions between them, the influence of external physical variables such as wind turbulences or the airwake when flying close to a ship structure. The airwake is modeled with a spatially non-uniformly distributed mean disturbance



Figure 1. Expert pilot performing an Astern approach. The outside-the-cockpit downward field of view was limited to 14.13° below the eye level. The ground projection also allows the pilot to see partially on his side the scene below the helicopter.

derived from data of wind tunnels obtained with a generic frigate model. The airwake directly affected the helicopter center of gravity.

The helicopter started at a distance of 1 km behind the ship deck position, an altitude of 65 m and a horizontal velocity of 40 knots and zero vertical speed. The ship's forward velocity was maintained at a constant 10 knots on Earth reference. An ideal point of touchdown was located on the flight deck and was represented by white lines. This was the point where the center of the landing target was located and over which the helicopter should maintain a relative hover before landing. A safe touchdown area was defined on the ship's flight deck as being the area where landing would occur without the rotor blade collapsing the hangar roof at the front, nor the helicopter falling off the right, left or rear edges of the deck.

Flights took place in clear visual conditions in a realistic maritime environment. The wind speeds were between 0 and 80 knots (maximal speed reached by wind gust) and directed toward -25° to $+25^\circ$ relative to the ship's longitudinal axis.

Procedure

Before starting, the pilots familiarized themselves with the simulator through 5 to 25 practice trials (see Table 2 for pilots and sea state details). The experiment started when the pilot and the experimenter agreed that the five mission task elements that constitute a successful landing maneuver, and described below, were consistently repeated during this familiarization phase. During the familiarization phase, the Euclidian distance from the deck center at touchdown was equal to 8.32 ± 5.92 m. The five mission task elements that pilots were requested to perform consisted in (i) an approach to the deck at an approximate 3° vertical angle by relying on a Stabilized Glide Slope Indicator System, (ii) a hover near the deck, (iii) a transition flight from that first hover position to a hover position over the deck, (iv) a hover over the deck and finally (v) a vertical descent to touchdown at a quiescent period of the deck.¹ It should be noted that two ship landing approach types, *astern*² and *fore/aft*,³ were tested in this experiment. In order to balance the influence of pilots' experience in real shipboard operations, pilots A and D were required to perform *fore/aft* whereas pilots B and C were required to perform *astern* approach tasks. We did not make the distinction between both approaches in the data analyses.

Independent Variables

The sea state, and thus the resulting deck movements, was manipulated. Two sea states, corresponding to levels 3 and 4 on the Douglas Sea Scale, were simulated. These sea states were featured by wave amplitudes from 0.5 m to 1.25 m and from 1.25 m to 2.5 m, for sea state levels 3 and 4, respectively. This resulted in different ship deck movements in *Calm sea* (RMS = 0.83° , 0.54° , and 0.20° ; Peak: $\pm 2.3^\circ$, $\pm 1.5^\circ$, and $\pm 0.7^\circ$) and *Moderate sea* (RMS: 1.60° , 0.85° , and 0.40° ; Peak: $\pm 5.0^\circ$, $\pm 3.0^\circ$, $\pm 1.0^\circ$ for the roll, pitch, yaw axes, respectively). More specifically, the Response Amplitude Operator model showed that the Lafayette frigate is light enough to be sensitive to the sea state manipulations as described in Table 1.

Table 1. Correspondence between Significant Heave Weight (SHW), computed as the mean wave height (from trough to crest) of the highest third of the waves, and the ship heave amplitudes for each sea state. std stands for standard deviation.

Sea State	Waves		Ship heave (in m)
	Period (in sec.)	SWH (in m)	Mean ± std
<i>Calm Sea</i>	7.5	0.9	2.31 ± .63
<i>Moderate Sea</i>	8.8	1.9	2.35 ± 1.14

Table 2. Helicopter-deck coupling expressed with Spearman’s correlation coefficient ρ with respect to the four pilots’ experiences (in columns) and sea states (in lines). For each pilot and sea state, the number of trials performed during the familiarization phase and the number of trials analyzed in the experiment are reported. The bottom rows indicate the type of approach performed by each pilot during the experiment and their operational experience. MAD stands for Median Absolute Deviation.

Sea State	Measures	Pilots					all
		A	B	C	D		
<i>Calm Sea</i>	Median	.63	.53	.41	.10	.42	
	MAD	.19	.15	.36	.32	.26	
	Familiarization	5	7	25	6	43	
	Experiment	4	17	5	27	53	
<i>Moderate Sea</i>	Median	.57	.69	-	.12	.61	
	MAD	.15	.01	-	.41	.15	
	Familiarization	None	3	1	1	5	
	Experiment	34	42	None	6	82	
Maneuver Experience	Type	<i>Fore/Aft</i>	<i>Astern</i>	<i>Astern</i>	<i>Fore/Aft</i>		
	Flight hours	4150	1770	2250	1850	10020	
	Deck landings	None	180	None	130	310	

Signal Processing and Dependent Variables

The raw data, recorded by the simulator and used for analyses, are made of the helicopter’s positions in 3D and translational speeds measured both at the helicopter’s center of gravity and at the ideal point of touchdown on the ship. Our methodology to reveal the strength of the helicopter-ship coupling consisted in investigating the correlation between the vertical positions of the ship’s deck and the helicopter. The signal of the helicopter vertical motion used in this correlation process must reflect the frequencies caused by the coupling with the ship, while avoiding taking into account the lowest frequencies, caused by the helicopter descent and the highest frequencies, caused by the noise in the simulator time stamping. For this sake, we identified lowest frequencies caused by the helicopter descent and highest frequencies caused by noise through a Fast Fourier Transform on the original signal of the helicopter vertical motion that revealed two extreme main frequencies: below 0.02 Hz for the descent and above 0.4 Hz for the noise. The helicopter’s vertical center of gravity positions were thus processed through a high-pass filter (cutoff frequency: 0.02 Hz), that allowed us to eliminate the lowest frequencies attributed to the helicopter descent frequency, and through a low-pass filter (cutoff frequency: 0.4 Hz), that allowed us to remove the highest frequencies attributed to noise in the simulator time stamping. This 2nd order band-pass filter was applied in both the forward and reverse directions to perform a zero-phase digital filtering on the helicopter’s vertical positions. Theoretically, pilots follow the 3° glideslope and are not expected to change their altitude as a function of ship vertical motion as described in previous analysis of the ship landing task (Tušl et al., 2020). The length of this phase remains however unclear. We therefore analyzed

the entire approach by splitting the time-series into seven bins, as a function of the relative horizontal distances between the helicopter and the deck. Given that the helicopter's speed tended to decrease on approach, the dimensions of the bins were determined logarithmically with the first one being larger when expressed as relative horizontal distance. This enabled us to balance the number of sample points among the bins. To ensure there wouldn't be any statistical artifact caused by the number of observations among the bins on our dependent variables, we interpolated 500 observations within each bin (shape-preserving interpolation with MATLAB function `interp1`). A visualization of the signal processing method during a typical trial unfolding is available on Figure S1 as supplemental data.

Dependent variables included Spearman's rank correlation coefficient ρ as a measure of the level of helicopter-ship coupling and the energy at impact. Spearman's rank correlation coefficient ρ was expected to mirror the strength of the helicopter-ship coupling and was computed through the entire approach on each of the seven bins between the vertical positions of the ship at the ideal point of touchdown and the helicopter's filtered center of gravity. The unfolding of the correlation during trial allowed us to distinguish the length of the uncoupled from the coupled part in the approach. The length of these parts in helicopter-deck coupling ρ throughout the seven bins were expressed as a function of the horizontal distance between the helicopter and the deck, the relative altitude (h) between the helicopter and the deck and the Time-To-Contact (TTC) that were computed within each bin and averaged over the sea state environments. TTC was computed by equation 1, where D_{rel} is the relative Euclidean distance between the helicopter and the deck and V_{rel} (i.e., D_{rel} 's derivative), the relative speed

$$TTC = D_{rel}/D_{rel}dot = D_{rel}/V_{rel} \quad (1)$$

Energy at impact was computed following the kinetic energy equation 2, where m is the helicopter mass and V_h and V_s are the respective velocities of the helicopter and the ship's deck at touchdown. The structural limit of energy that can be absorbed by a real rotorcraft without damage (cf. US Navy, NATOPS Flight Manual, 2004) is bounded at $V_h - V_s = 3.6576$ m/sec. Because we normalized this energy by the helicopter's weight, energy results are given only as a function of the relative velocity at impact.

$$E_k = 0.5m(V_h - V_s)^2 \quad (2)$$

We computed precision at landing, measured as the Euclidean distance (in meters) between the actual and the ideal point of touchdown, to ensure that we analyzed only successful maneuvers. Only trials with significant correlation coefficients within the final bin and with an Euclidean distance relative to the deck center at touchdown below 25 m were kept for the rest of the analysis. Altogether, one trial was rejected due to poor precision on landing (Euclidean distance from deck center at touchdown equal to 38.00 m, well above the 4.90 ± 4.56 m landing precision gained on the remaining trials) and 12 trials due to a non-significant correlation level (all performed by the pilot D, landing precision equal to 9.01 ± 3.10 m). The total number of analysed trials was 135 (see Table 2 for pilots and sea state details), comprising not only un-coupled (but significant) and coupled trials but also rough (30 trials for which $E_k >$ structural limitations of the helicopter) and soft landings. This set of data therefore allows investigating how often a coupling strategy resulted in a good landing when considering the energy at impact.

Results

Dynamics of the Helicopter-deck Coupling

To investigate the coupling between the helicopter and the vertical movements of the ship's deck, analyses focused on the evolution of the correlation coefficients between the helicopter and the deck's vertical movements during the maneuver. Table 2 recaps the individual computations of correlation coefficient ρ as a function of sea state. Figure 2 shows the pattern of changes of the interindividual median correlation coefficient ρ during the maneuver as a function of different metrics (i.e., *TTC*, relative altitude of the helicopter with regards to the ship's deck, distance from ship's deck). The dynamics of the coupling were found to develop during the maneuver into two distinct phases. Firstly, the correlation coefficients were close to $\rho = 0$, suggesting that the helicopter's movements were not coupled with the ship's deck movements. Finally, the correlation coefficients quickly increased when the helicopter was close to the deck (below 15 m of horizontal distance) to reach $\rho = 0.61$ in *Moderate sea* and $\rho = 0.42$ in *Calm sea*. This suggests that pilots had phased the helicopter's vertical movement to that of the ship during this final part of the maneuver. During the final part of the landing maneuver, the correlation coefficients increase from the first occurrence of a positive correlation coefficient until they reach a significantly higher value within the final bin (Spearman's ρ equal to 0.42 ± 0.26 and 0.61 ± 0.15 for the *Calm sea* and *Moderate sea* environments, respectively, see Figure 3 for Friedman test of significance and Nemenyi post hoc test).

Besides, the fact that the coupling between the helicopter and deck at the touchdown appears to be stronger in *Moderate sea* than in *Calm sea* (Spearman's ρ equal to 0.61 ± 0.15 vs. 0.42 ± 0.26), these results also suggests that pilots coupled their helicopter vertical displacements with the deck heave only during the final part of the maneuver, starting from below 85 m to touchdown and reaching a peak from 15 m to touchdown. This coupling during the final part of the maneuver appears to be actively controlled through the collective control in order to phase the helicopter vertical displacements with those of the ship. Indeed, the profile of the collective control signal during a sample trial duration (see figure S1 provided as supplemental data) changes near the hover position to exhibit sharpened oscillations at the frequency of ship motion and phased with the direction of the ship motion. This result is consistent with previous field studies (Berbaum et al., 1991; Minotra & Feigh, 2018) which observed that flight was visually regulated when entering its final phase. Moreover, the stronger coupling observed in *Moderate sea* in comparison to *Calm sea* (see Table 2) was consistent with the need for a stronger perceptual-motor coupling in *Moderate sea* so as to compensate for higher heave movements of the deck and thus minimize the energy at impact.

Functional Nature of the Helicopter-Deck Coupling

Analyses thus secondly focused on the link between the helicopter-deck correlation at hover-touchdown moment and performance indicators so as to investigate the functional nature of the helicopter-deck coupling. Theoretically, as the pilots' safety mainly relies on the minimization of energy at touchdown, being coupled with the deck's vertical oscillations may be an efficient strategy to better control energy at impact. Indeed, the coupling helps to minimize the relative velocity between the two vehicles. In that sense, a strong helicopter-

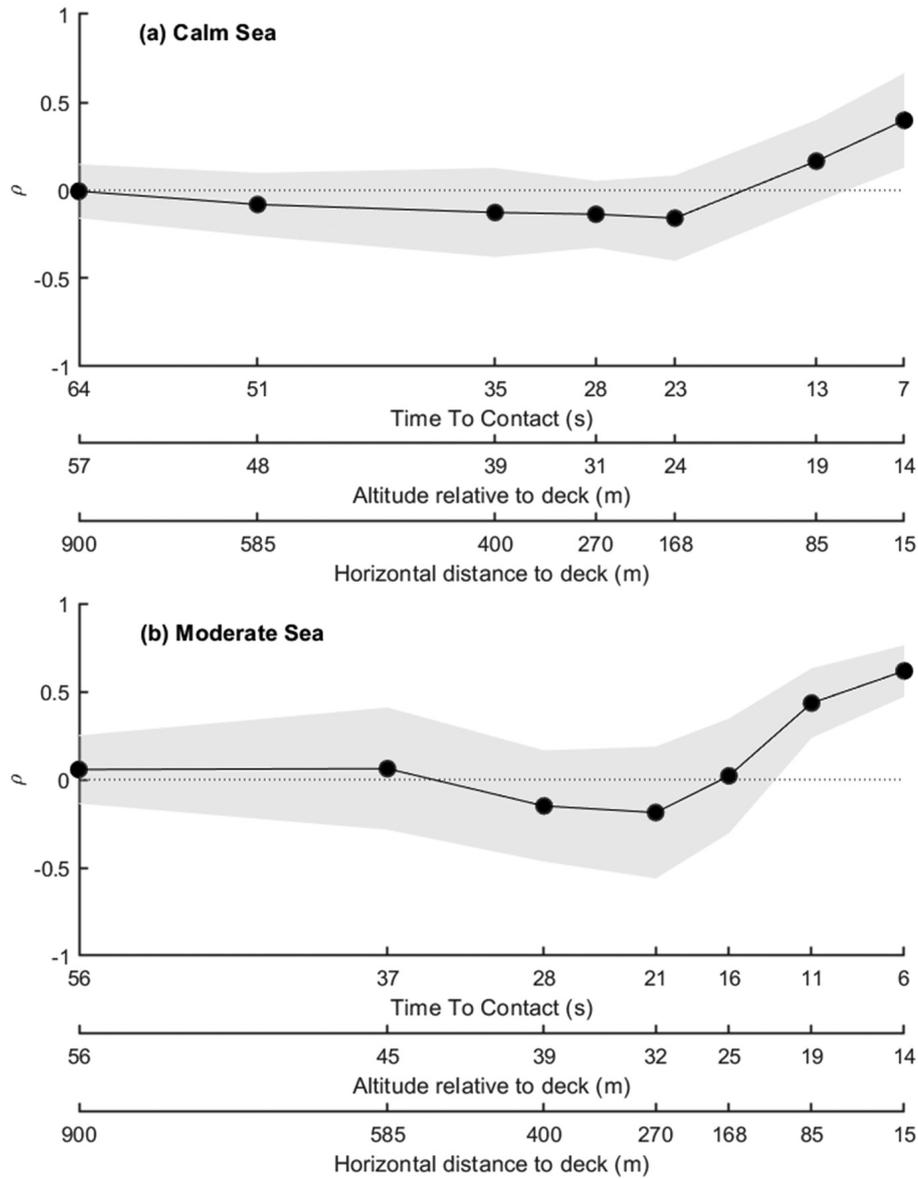
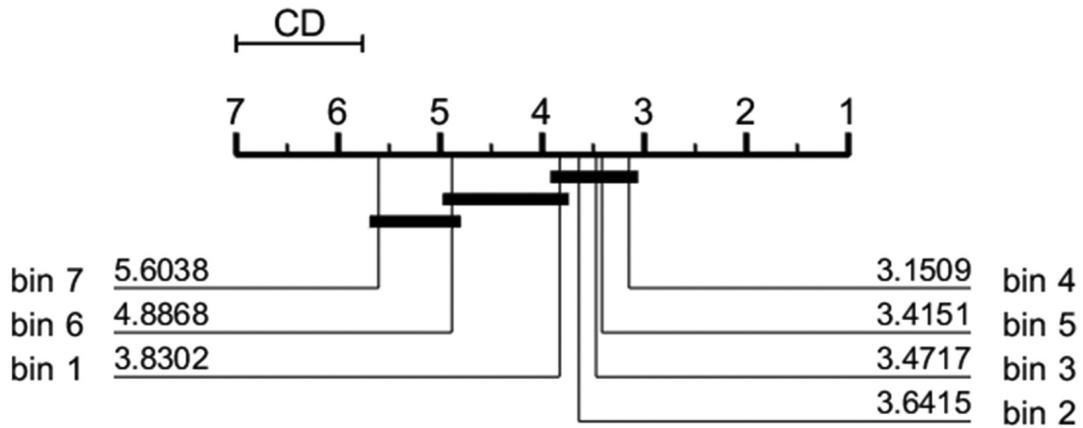


Figure 2. Changes in interindividual median values of Spearman's rank correlation coefficient (ρ) between the helicopter and ship deck's vertical movement during the unfolding of the landing maneuver in *Calm sea* (top) and *Moderate sea* (bottom). ρ values are expressed as a function of the average time-to-contact value during each bin, and as a function of the largest altitude relative to deck and the largest distance relative to deck observed for each bin. Grey areas represent median absolute deviation.

deck coupling could thus be seen as an effective way of the pilots putting the helicopter into good energetic conditions before touching down.⁴

We thus scrutinized the link between the helicopter-deck coupling at touchdown (i.e., correlation coefficient ρ gained in the final bin before touchdown) and the energy at

(a) Calm Sea



(b) Moderate Sea

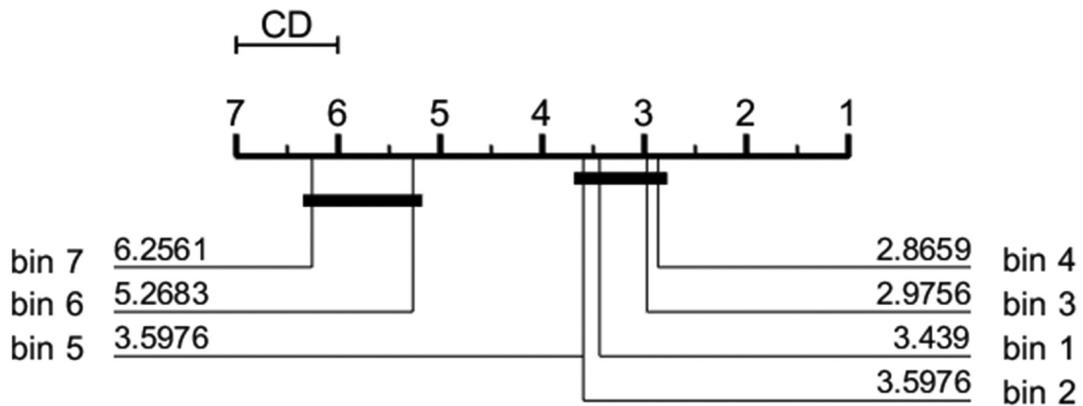


Figure 3. Visualization of the Nemenyi test for *Calm sea* (top graph, Friedman p -value < 0.01 , Nemenyi critical distance = 1.23) and *Moderate sea* conditions (bottom graph, Friedman p -value < 0.01 , Nemenyi critical distance = 0.99). For bins included in horizontal brackets there is no evidence of significant differences at 5% level. Bins that can't be grouped under the same bracket therefore have significantly different correlation scores.

impact. Figure 4 firstly shows that most of the landing maneuvers were performed with an energy at impact inferior to the structural limits of the helicopter. This suggests that pilots

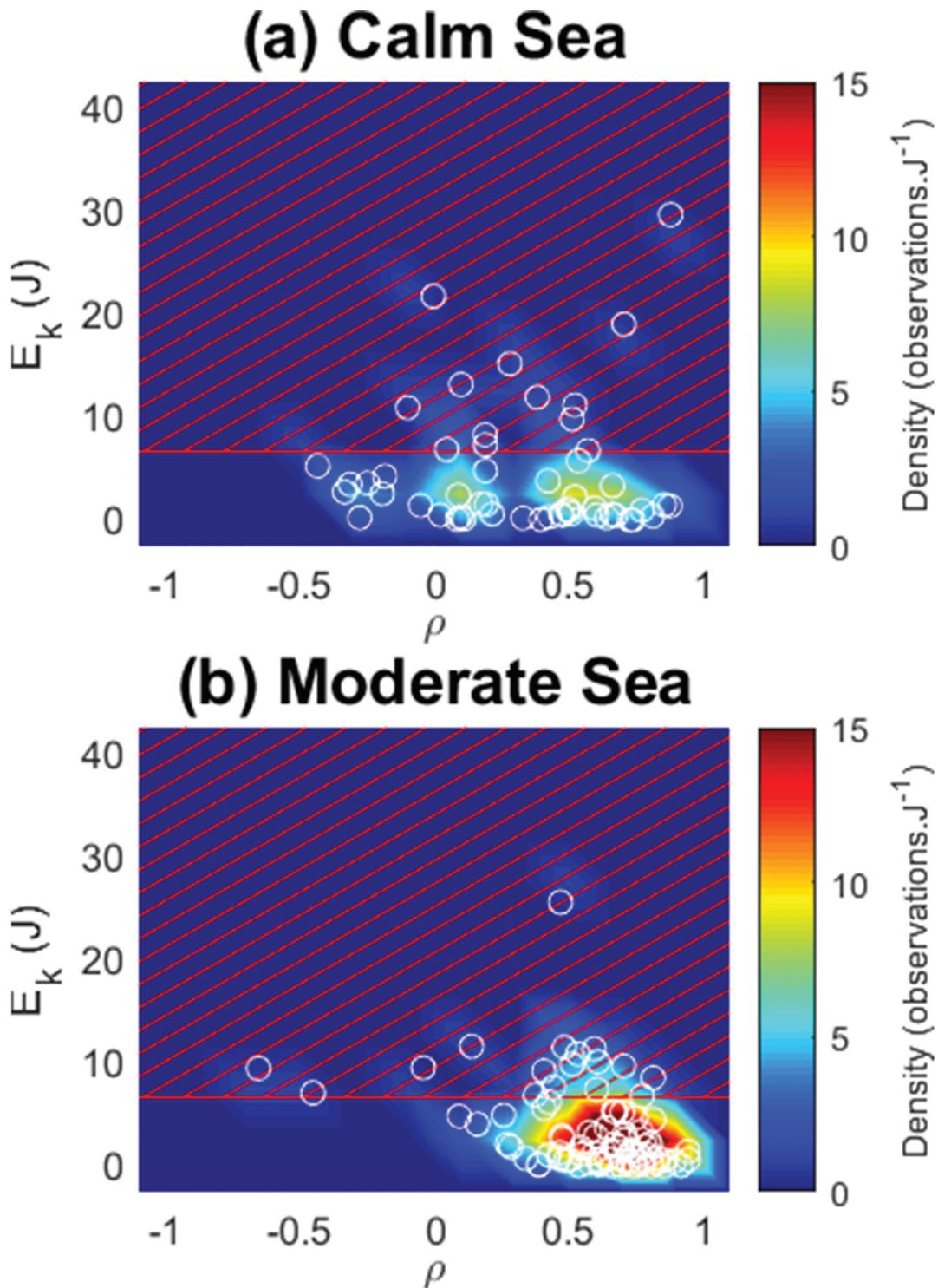


Figure 4. Energy at impact (E_k , in joules) expressed as a function of the Spearman's rank correlation coefficient ρ computed at the touchdown for all trials in the Calm sea and Moderate sea environments. Color temperature is a function of density of observations. The horizontal red line represents the structural limit of energy that can be absorbed by a real rotorcraft (from US Navy, NATOPS Flight Manual, US Navy, 2004) above which (hatched area) the energy at impact is too rough and results in structural degradations.

not only coped with the instruction to minimize the energy at impact but also that their behavior were ecologically valid. Figure 4 also shows that Spearman's rank coefficient ρ at touchdown was distributed in the lower right part of the graph in most of the trials, underlining the strong coupling between the helicopter and deck heave movements reported in the previous section. Moreover, negative, significant correlation between the helicopter-deck coupling at touchdown and energy at impact was found ($\rho = -0.27$, $p < .01$). In other words, the better the helicopter-deck coupling, the lower the energy at impact. A finer analysis revealed that this effect is observed in *Moderate Sea* environments ($\rho = -0.37$, $p < .01$) but not in *Calm sea* environments ($\rho = -0.17$, $p = .21$). Note that we tested real pilots, and among them experts in ship deck landing, who were more able to control the helicopter movement so as to couple with the ship's movement more finely than novices would probably be able to do, thus explaining the lack of low Spearman's rank coefficient at touchdown and weak resulting correlation with the energy at impact. In other words, if novice participants attempted to land, they would probably be unable to pick up information required to synchronize themselves with the deck motion that would in return prevent them to minimize the energy at impact. In this case, we would have observed that un-coupled trials would result in a negative correlation with energy at impact. Such additional data set would result in stronger covariance measures which then result in stronger Spearman coefficients, especially in *Moderate sea* conditions. Nevertheless, these results suggest that the observed coupling during the final part of the landing maneuver plays a functional role, by helping pilots to minimize the energy at impact, allowing them to complete safe landings.

Discussion

In this study, the dynamics of the visual coupling between a helicopter's altitude and ship deck heave movements during a landing maneuver were investigated to understand their functional role. Expert pilots were instructed to perform landing maneuvers in a realistic rotorcraft simulator. The sea environment, generating ship deck heave movements, was adjusted and correlated to changes in the helicopter's altitude.

The analyses of changes in the correlation between helicopter position and vertical deck movements during the maneuver revealed that pilots only coupled their helicopter's altitude with deck movements during the final phase of the maneuver. The dynamics of helicopter-deck coupling developed through two main phases: no initial coupling and finally a phase-locked helicopter-deck coupling. Such a gradual coupling between an agent and its environment is a phenomenon accompanied by a gradual decrease of behavioral variability (also called *functional variability* or *compensatory variability*) that was previously discussed in landing tasks (Grosz et al., 1995). Often, this behavioral adaptation is a signature of expertise. Indeed, functional variability allows for the emergence of a movement that is tailored toward the end goal (touchdown with a minimum energy at impact in our case).

Correlating the helicopter and vertical deck movements at touchdown and the energy at impact secondly provided insight into the functional role of visual coupling between the helicopter and the landing spot on the deck. Consequently, we have shown that, not only was the strength of the coupling at the touchdown higher in *Moderate sea* than in *Calm sea* (i.e., a stronger correlation between the helicopter's changes in altitude and deck heave movements) but also that the strength of the coupling is closely linked to the success or at

least the safety of the maneuver. Indeed, a negative correlation was found between the strength of the helicopter-deck coupling at the touchdown and the energy at impact. In other words, the stronger the correlation between helicopter and deck vertical movement before the landing, the lesser the energy at impact. We are suggesting that such a perceptual-motor coupling between the pilots and the vertical movements of the ship's deck approaching touchdown has a functional nature, aiming at minimizing kinetic energy at impact, by nulling the relative speed between helicopter and deck during the hovering phase, and therefore minimizing the total amount of relative energy in the system, before triggering the vertical descent toward touchdown at a quiescent period, for instance. Additionally, the helicopter's vertical movements may have served as exploratory movements designed to enhance the pick-up of the deck's heave pseudo-frequency, that is, the frequency at which the deck is most likely to oscillate. This is in line with the Gibsonian view considering perception as an active process of obtaining information about the surrounding environment and which gave rise to the famous hypothesis that an agent has to move in order to perceive and perceive in order to move (Gibson, 1979).

Application of these results is possible in the design of visual aids for ship landing. Hence, this experiment could be understood as a work domain analysis preceding the Ecological Interface Design (Vicente & Rasmussen, 1990). We indeed evidenced the importance of strong coupling between the helicopter and deck vertical motions from the hover position to succeed in minimizing energy at impact when landing on-sight. Depending on the functional role of such a behavior, several visual aids available from the hover position can be proposed. In the case pilots perform vertical exploratory movements aiming at extracting information about the ship's deck oscillation properties, then visual guidance should facilitate the information pick up by revealing for instance, the future quiescent period favorable for landing. Such a visual guidance would replace the natural coupling strategy and avoid the extra demand induced by helicopter vertical motion on the engine. In case pilots perform vertical movements aiming at putting the helicopter-ship system into favorable conditions for landing (by nulling the relative speed and therefore the total amount of relative energy in the helicopter-ship system before triggering the touchdown phase for instance), then a visual guidance should facilitate the helicopter-ship coupling. The vertical oscillations of the helicopter induced by such a visual guidance might be worth the extra demand it produces.

Further investigations will be needed to reveal the visual information – like Tau (Padfield, 2011) – that guide helicopter's control, to model the architecture of the perceptual-motor mechanism underlying the coupling between pilots and their environment – law of control (Warren, 1988) or affordance-based-model (Fajen, 2007) – as well as the effectiveness of visual guidance to ship's deck landing based on the elicited mechanism.

Notes

1. “In seakeeping terminology, the Quiescent Period is known as the period of calm in rough waters to allow the ship to perform operations such as landing aircraft and unmanned aerial vehicles (UAVs), as well as the entry of landing craft in the basin. Quiescence refers to the interval of time where all ship motions are within acceptable limits to perform a desired activity” (Riola et al., 2013).
2. The astern procedure consists of approaching the ship's deck from the stern along the ship's center line until reaching the hover position over about 10–15 ft above the flight deck before performing a vertical descent to land. This procedure is usually adopted world-wide for

precautionary or emergency landings, given that the helicopter is already in the right profile for emergency procedures.

3. The fore-aft procedure consists of approaching the ship's deck from the stern, along a line to the left or right of the ship's centreline (called fore-aft port or fore-aft starboard procedures, respectively), approximately 1.5 times the diameter of the main rotor at the center of the deck. Then, the helicopter flies side-wards following the "bum-line" horizontal deck marking from the hover alongside right or left position to the hover over about 10–15 ft above the flight deck before performing a vertical descend to land. Since in most cases, the pilot flying is sitting in the right seat, the fore-aft port procedure enables the best visual cues with the ship (Hoencamp, 2015).
4. Good Energetic conditions imply a sufficient velocity at impact to stick on the deck, especially in the case of deck roll at touchdown but acceptable velocity at impact to avoid structural damages on the helicopter (US Navy, NATOPS Flight Manual, US Navy, 2004) and trauma on pilots' spines (Desjardins et al., 1989).

Acknowledgments

The authors wish to thank David Wood (English at your Service, <http://www.eays.eu/>) for revising the English of the manuscript. The participation of Mathieu Thomas in this research project was supported by a grant from the Direction Générale de l'Armement (DGA) and the Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA).

Disclosure Statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

Funding

This work was supported by the Direction Générale de l'Armement (DGA); and the Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA).

References

- Benoit, B., Dequin, A.-M., Kampa, K., Grunhagen, W., Basset, P.-M., & Gimonet, B. (2000). HOST, a general helicopter simulation tool for Germany and France. *56th Annual Forum of the American Helicopter Society*, 56(2), 1110–1131. https://scholar.google.com/scholar?cluster=5098413983676911617&hl=fr&as_sdt=0,5
- Berbaum, K. S., Kennedy, R. S., & Hettinger, L. J. (1991). Visual tasks in helicopter shipboard landing. *Applied Ergonomics*, 22(4), 231–239. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(91\)90226-8](https://doi.org/10.1016/0003-6870(91)90226-8)
- Desjardins, S. P., Zimmerman, R. E., Bolukbasi, A. O., & Merritt, N. A. (1989). *Aircraft crash survival design guide. Volume 4. Aircraft seats, restraints, litters, and cockpit/cabin delethalization* (p. 271). Phoenix, AZ: Simula Inc.
- Fajen, B. R. (2007). Affordance-based control of visually guided action. *Ecological Psychology*, 19(4), 383–410. <https://doi.org/10.1080/10407410701557877>
- Figueira, J. M. P., Taghizad, A., & Abid, M. (2015, September). *Model of helicopter pilot's controls activity for shipboard operations*. 41st European Rotorcraft Forum. Munich, Germany.
- Galanis, G., Jennings, A., & Beckett, P. (1998). A mathematical model of glide-slope perception in the visual approach to landing. *The International Journal of Aviation Psychology*, 8(2), 83–101. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0802_1
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. US.

- Grosz, J., Rysdyk, R., Bootsma, R. J., Mulder, J. A., van der Vaart, J. C., & van Wieringen, P. W. (1995). Perceptual support for timing of the flare in the landing of an aircraft. In P. Hancock, J. Flach, J. Caird, & K. Vicente (Eds.), *Local applications of the ecological approach to human-machine systems* (pp. 104–121). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc. <https://psycnet.apa.org/record/1995-97955-004>
- Hoencamp, A. (2015). *Helicopter-ship qualification testing - the theory and application of a novel test methodology optimizing for cost and time efficiency* [Ph.D. Dissertation]. Technische Universiteit Delft.
- Jacobs, D. M., Morice, A. H., Camachon, C., & Montagne, G. (2018). Eye position affects flight altitude in visual approach to landing independent of level of expertise of pilot. *PloS One*, 13(5), e0197585. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197585>
- Journée, J., & Massie, W. (2001). *Offshore hydrodynamics* (1st ed.). Delft University of Technology.
- Minotra, D., & Feigh, K. (2018). Studying pilot cognition in ship-based helicopter landing maneuvers. In *Proceedings of the American helicopter society international forum* (p. 74). Phoenix, AZ.
- Padfield, G. D. (2011). The tau of flight control. *The Aeronautical Journal*, 115(1171), 521–556. <https://doi.org/10.1017/S0001924000006187>
- Riola, J. M., Girón, J. M., & Díaz, J. J. (2013). Smoothing warships movements based on wavelets. *Ciencia y tecnología de buques*, 6(12), 51–62. <https://doi.org/10.25043/19098642.78>
- Techet, A. (2005). *Design principles for ocean vehicles*. MIT OpenCourseWare.
- Tušl, M., Rainieri, G., Fraboni, F., De Angelis, M., Polo, M., Pietrantoni, L., & Pingitore, A. (2020). Helicopter pilots' tasks, subjective workload, and the role of external visual cues during shipboard landing. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 14(3), 155534342094872. <https://doi.org/10.1177/1555343420948720>
- US Navy. (2004, March 1). *NATOPS Flight Manual - Navy Model SH-60B aircraft* [US Navy A1-H60BB-NFM-000].
- Vicente, K. J., & Rasmussen, J. (1990, September). The ecology of human-machine systems II: Mediating “Direct perception” in complex work domains. *Ecological Psychology*, 2(3), 207–249. https://doi.org/10.1207/s15326969eco0203_2
- Warren, W. H. (1988). Action modes and laws of control for the visual guidance of action. In O.G Meijer & K. Roth (Eds.), *Advances in psychology* (Vol. 50, pp. 339–379). North-Holland.

4. Modélisations

Sommaire

4.1. Objectifs	90
4.2. Développements	92
4.2.1. Modèle hélicoptère	92
4.2.2. Modèle navire	93
4.3. Simulations numériques	94
4.3.1. Méthode	94
4.3.1.1. Paramètres de la simulation	94
4.3.1.2. Solver	94
4.3.2. Résultats stationnaire absolu	95
4.3.3. Comparaison au modèle plus réaliste	96
4.3.3.1. Modèle hélicoptère	96
4.3.3.2. Modèle navire	96
4.3.3.3. Paramètres de la simulation	96
4.3.4. Résultats modèle plus réaliste	97
4.3.5. Simulation de la synchronisation hélicoptère - navire	98
4.3.5.1. Paramètres de la simulation	98
4.3.6. Résultats simulation synchronisation	98
4.3.7. Comparaison stratégie de couplage et stationnaire absolu	99
4.4. Discussion et conclusion	101
4.4.1. Intérêt d'une stratégie de couplage	102
4.4.2. Perspectives de simulations futures	103
4.4.3. Augmenter le réalisme des modèles numériques	103
4.4.4. Direction	104

4.1. Objectifs

Nous avons vu dans le chapitre précédent (chapitre 3) que des pilotes appontant sur simulateur immersif tendaient à synchroniser les déplacements verticaux de leur hélicoptère avec ceux de la frégate (mouvements de pilonnement) dans la dernière phase de la manoeuvre, la phase de stationnaire et poser (cf chapitre 2). Nous nous questionnons sur la raison pour laquelle une telle stratégie serait bénéfique. En effet l'activité au commande nécessaire pour se synchroniser avec les déplacements du navire a un coût pour le pilote (en atteste la mesure DIMSS PM, *Dynamic Interface Modeling and Simulation System Product Metric*, qui est effectivement basée sur la

fréquence et l'amplitude des actions aux commandes pour quantifier la charge de travail des pilotes, ROSCOE et WILKINSON 2002). Il semblerait alors logique que les pilotes limitent leur activité aux commandes afin de limiter le coût en résultant. Pourquoi une telle stratégie est-elle mise en place, a fortiori par mer agitée? L'expérience 1 (chapitre 3) apporte des éléments de réponse à cette question. Il semble que cette stratégie soit bénéfique pour la sécurité de la manoeuvre car elle permettrait de maintenir l'énergie à l'impact parmi les limites tolérables par la structure de l'hélicoptère et le pilote. Pour rappel, cette limite d'énergie (ou de vitesse relative) à l'impact est rapportée comme un critère de réussite dans la littérature ayant alimenté l'analyse du domaine de travail au chapitre 2. La question que nous nous posons devient alors, comment une stratégie de synchronisation permet-elle de contrôler / limiter l'énergie à l'impact? A cette question nous avons avancé deux hypothèses. Selon la première, les mouvements de synchronisation seraient des mouvements exploratoires visant à accéder à de l'information permettant de mieux percevoir les possibilités d'apponter dans les limites de sécurité. La deuxième hypothèse suggère que la stratégie de synchronisation permet au pilote de se placer dans les conditions optimales avant de déclencher le poser. Selon cette deuxième hypothèse il s'agirait pour le pilote d'agir de façon à optimiser ses possibilités d'action. Nous pensons que la modélisation et la simulation numérique des possibilités d'action des pilotes permettra d'apporter des éléments de réponse aux questions soulevées ci-dessus. Plus précisément, le but de ce chapitre est d'établir une représentation graphique des possibilités d'appontage en termes d'énergie à l'impact. Cette représentation est le résultat de simulations numériques du modèle de possibilités d'appontage.

En effet il est nécessaire de faire le lien entre la vitesse à l'impact et l'activité aux commandes des pilotes. Un modèle basé sur la dynamique du vol et la dynamique du navire permettra de formaliser ce lien. Le but des développements mathématiques suivants est donc de modéliser la vitesse à l'impact en fonction de l'état courant de l'hélicoptère et du navire. Le but des simulations numériques qui s'ensuivent est de représenter les possibilités d'action des pilotes et leur évolution en fonction de l'activité aux commandes. Il s'agit de représenter l'espace du problème, l'affordance d'appontabilité, dans sa dimension de vitesse (déterminant directement l'énergie à l'impact), de sorte à exprimer le comportement des pilotes (leurs actions aux commandes) en fonction de leurs buts (respecter une limite d'énergie à l'impact). Nous pourrions dans un second temps simuler et comparer une stratégie de stationnaire sans couplage, c'est-à-dire une stratégie de stationnaire dans le repère terrestre (supposée moins coûteuse en ressources physiques et mentales) à la stratégie de couplage observée en situations réalistes (chapitre 3, supposée plus sûre). Cette méthode devrait nous permettre d'observer l'effet d'une stratégie de couplage et ainsi tester l'hypothèse que cette stratégie consiste à arranger le paysage de possibilités de façon à améliorer les conditions de poser.

4.2. Développements

La modélisation de l'affordance d'appontabilité nécessite un modèle de la dynamique de l'hélicoptère et du navire. Nous rapportons les développements mathématiques et les postulats et simplifications à l'origine de ces modèles dans la section suivante.

4.2.1. Modèle hélicoptère

Premièrement nous ne considérons ici que les mouvements de translations verticaux de l'hélicoptère. En effet, lors de l'étude 1 3 nous avons pu observer que l'activité sur la commande de pas collectif constituait l'essentielle de l'activité aux commandes lors de la phase de stationnaire et de poser (cf supplemental data de l'étude au chapitre A). C'est majoritairement et presque exclusivement via cette commande que le pilote contrôle l'altitude de l'hélicoptère dans la phase de stationnaire et poser (cf chapitre 2 pour plus de détail sur le contrôle du vol). Nous simplifions donc les forces agissantes sur l'hélicoptère en ne considérant que la portance (contrôlée par la commande de pas collectif) et le poids agissant en sens opposé. Nous considérons que ces forces s'appliquent au centre de gravité de l'hélicoptère comme illustré à la figure 4.1.

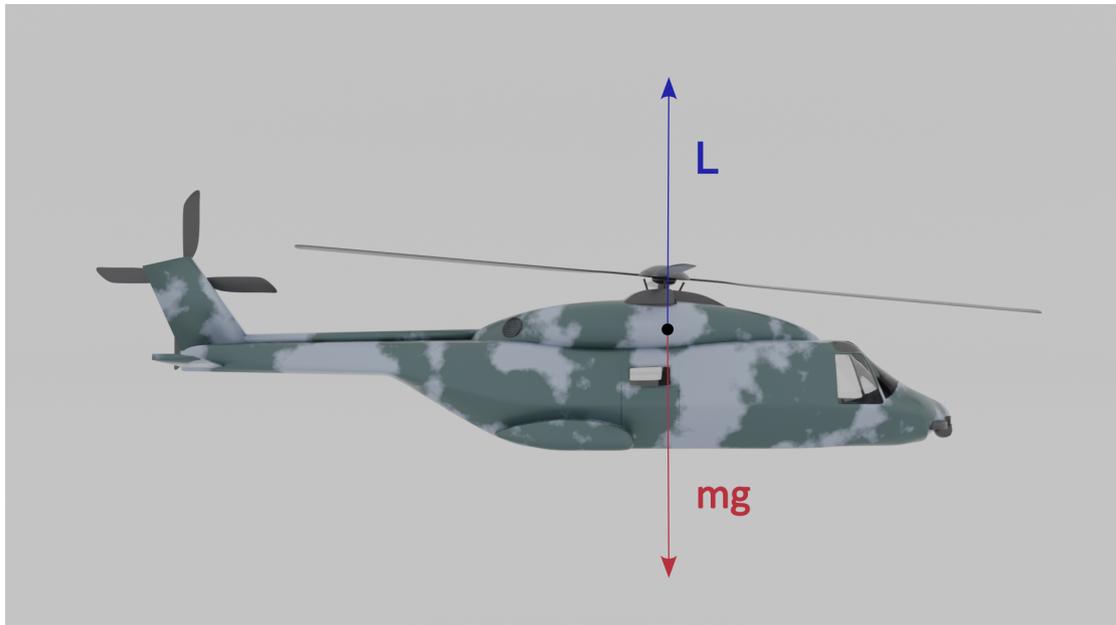


FIGURE 4.1. – Le modèle d'hélicoptère comprend la portance L et le poids (force d'attraction due à la gravité) $m \times g$ s'appliquant en sens opposé, au centre de gravité de l'hélicoptère.

Ainsi d'après les lois fondamentales de la physique newtonienne, on peut définir Z_{h_t} l'altitude de l'hélicoptère dans le repère terrestre à un instant t après application

d'une portance actuelle $L_{actuelle}$ pendant une période de temps Δ_t , en fonction de ses vitesse $V_{h_{actuelle}}$ et position actuelles $Z_{h_{actuelle}}$ telle que :

$$Z_{h_t} = Z_{h_{actuelle}} + V_{h_{actuelle}} \times \Delta_t + 0.5 \times \left(\frac{L_{actuelle}}{m} - g \right) \times \Delta_t^2 \quad (4.1)$$

Avec g l'accélération due à la gravité terrestre et m la masse de l'hélicoptère.

La vitesse de l'hélicoptère à l'instant t , V_{h_t} est simplement la dérivée de sa position (équation 4.1) :

$$V_{h_t} = V_{h_{actuelle}} + \left(\frac{L_{actuelle}}{m} - g \right) \times \Delta_t \quad (4.2)$$

4.2.2. Modèle navire

Nous avons pris le parti de modéliser la dynamique du navire en translation sur l'axe vertical par une fonction sinusoïdale et sa dérivée. Ce choix est établie sur la base de nos observations de la dynamique simulée du navire à l'expérimentation 1 (chapitre 3) qui exhibe les caractéristiques d'un signal périodique, oscillant, ce que capturent des modèles basés sur des fonctions sinusoïdales. Ce choix est appuyé par les études sur la dynamiques des navires soumis à la houle qui suggèrent que les mouvements du navire peuvent être capturés par une somme de fonctions sinusoïdales (FOURIE et T. JONES 2015). Dans notre cas, nous avons simplifié la dynamique du navire en ne considérant qu'une seule fonction sinusoïdale. Le navire simulé exhibe donc une dynamique parfaitement stable et régulière mais préservant des propriétés d'oscillations essentielles, caractéristiques du navire soumis à la houle. Ainsi nous pouvons définir Z_{n_t} les positions du navire à l'instant t tel que :

$$Z_{n_t} = A \times \sin(2 \times \pi \times f \times \Delta_t + \phi_{actuelle}) \quad (4.3)$$

Avec A et f respectivement l'amplitude et la fréquence d'oscillation du pont du navire et $\phi_{actuelle}$ la phase actuelle du navire.

La vitesse du navire à l'instant t , V_{n_t} est la dérivée de sa position (équation 4.3) :

$$V_{n_t} = A \times 2 \times \pi \times f \times \cos(2 \times \pi \times f \times \Delta_t + \phi_{actuelle}) \quad (4.4)$$

La soustraction de la vitesse de l'hélicoptère à celle du navire nous permet d'obtenir la vitesse relative V_{rel_t} à l'instant t . En combinant les équations 4.4 et 4.2 on obtient :

$$V_{rel_t} = A \times 2 \times \pi \times f \times \cos(2 \times \pi \times f \times \Delta_t + \phi_{actuelle}) - V_{h_{actuelle}} + \left(\frac{L_{actuelle}}{m} - g \right) \times \Delta_t \quad (4.5)$$

En définissant Δ_t le temps avant impact, i.e., le temps restant avant que $Z_{h_t} = Z_{n_t}$ on obtient la vitesse relative à l'impact, au moment du poser de l'hélicoptère sur le

pont et par extension l'énergie à l'impact $E_{poser} = \frac{1}{2} \times m \times V_{rel,t}^2$. Étant donné que nos références établissent les limites en vitesses (MINOTRA et Karen M FEIGH 2018; HERRY 2010) nous nous référerons exclusivement à l'équation 4.5 dans la suite de nos travaux et simulations, mais gardons à l'esprit que l'énergie n'est qu'une simple conversion de cette équation.

4.3. Simulations numériques

4.3.1. Méthode

La figure 4.2 présente les possibilités d'appontage en fonction de la gamme de portances disponibles au cours du temps. La simulation a été implémentée sur le logiciel MATLAB version 2018 a.

4.3.1.1. Paramètres de la simulation

Les modèles hélicoptère et navire simulés sont décrits dans les équations 4.1, 4.2, 4.3 et 4.4. La masse de l'hélicoptère est fixée à 10 tonnes, une masse que peuvent atteindre les hélicoptères de la gamme NH-90 type caïman par exemple ou les PUMA. L'altitude initiale simulée ($Z_{h_{actuelle}}$ à $t = 0s$) est de 5m et la vitesse initiale ($V_{h_{actuelle}}$ à $t = 0s$) de $0m.s^{-1}$ dans le repère terrestre. L'hélicoptère est parfaitement stationnaire dans le repère terrestre tout au long de la simulation. L'amplitude A et la fréquence f du navire sont respectivement fixées à 2.5m et 0.14Hz. La simulation dure 14s, soit deux cycles complets d'oscillation du pont du navire simulé, avec un pas de temps de 0.1s. La vitesse à l'impact pour chacune des portances de la gamme de portances disponibles est calculée à chaque instant d'après l'équation 4.5. La gamme de portances disponibles simulée s'étend de 50 à 120KN avec un pas de 100N.

4.3.1.2. Solver

Afin de déterminer la vitesse d'impact d'après l'équation 4.5, il est nécessaire de déterminer Δ_t , le moment où le contact avec le pont a lieu. Hors l'équation $Z_{h_t} = Z_{n_t}$, ne possède pas de solution analytique pour Δ_t . Ainsi, nous déterminons la valeur de Δ_t numériquement grâce à un solver. Le solver choisi est de type Newton-Raphson comportant un paramètre de relaxation de 0.8 (afin d'éviter les minimums qui ne seraient pas un optimum) et un paramètre de précision de 0.01s assurant une proximité raisonnable entre le Δ_t ainsi trouvé et le Δ_t théorique.

4.3.2. Résultats stationnaire absolu

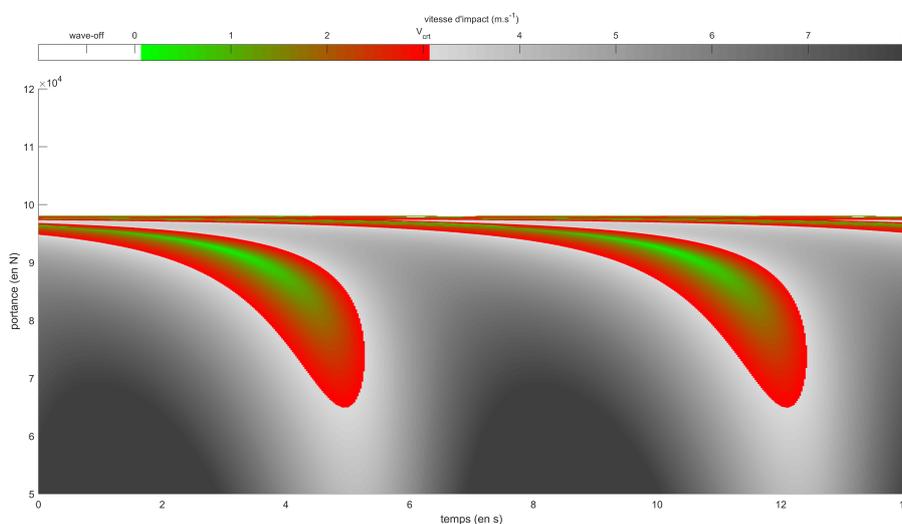


FIGURE 4.2. – Simulation des possibilités d'appontage pour un hélicoptère de 10 tonnes en stationnaire dans le repère terrestre à 5m, à la verticale d'un navire oscillant à une amplitude de 2.5m et une fréquence de 0.14Hz

La figure 4.2 montre qu'à certains instants (à $t = 2s$ par exemple) peu de portances permettent de se poser dans les limites de sécurité ou d'éviter le pont en comparaison à d'autres instants (à $t = 7s$ par exemple) où le risque de toucher le pont avec une forte vitesse relative est plus faible. A $t = 2s$ toute portance en dessous des 90 KN résultera en une vitesse d'impact supérieur à $6m.s^{-1}$ (couleur tendant vers le noir), soit deux fois la limite de sécurité établie au chapitre 2. En revanche, à $t = 7s$ la majorité des vitesses à l'impact est inférieure à $6m.s^{-1}$ (couleurs s'éloignant des teintes de gris). Le timing auquel le pilote choisit de déclencher le poser à partir de la position de stationnaire est donc déterminant des conditions de sécurité. De même on observe qu'à un même moment certaines portances résultent en des vitesses d'impact minimales. Par exemple à $t = 2s$ appliquer une portance de 96 KN environ permettra de minimiser la vitesse d'impact. Ainsi la simulation capture des caractéristiques essentielles de l'appontage, à savoir que la sécurité dépend à la fois du choix de l'instant et de la portance à laquelle la manoeuvre sera effectuée.

Soulignons enfin une singularité amusante. Il semble que tant qu'il existe une portance permettant d'éviter le pont (couleur blanche) alors il existe une multitude de possibilités d'apponter en sécurité. Cette évidence est capturée par le modèle. En effet sur la figure 4.2 il apparaît que les "vallées" de faibles vitesses d'impact (couleurs vertes et rouges) s'étirent à partir d'un point qui est la portance annulant exactement la force d'attraction de la gravité (donc celle permettant le stationnaire parfait). En effet, il semble qu'une multitude de vallées soient comme "aspirées" par ce point et se

développent au cours du temps à partir de ce dernier.

Une rapide description qualitative de la figure obtenue par la simulation des possibilités d'appontage calculées sur la base des équations 4.5 nous a permis de soumettre le modèle à la logique. Il semble effectivement que le modèle capture les enjeux de l'appontage, au moins qualitativement. L'enjeu du choix de la portance et du timing auquel déclencher le poser ainsi que l'infinité des possibilités de poser en sécurité, lorsque le stationnaire est maintenu, sont en effet capturés par le modèle. Enfin remarquons que le modèle est généralisable au cas de l'atterrissage. En effet, en fixant les paramètres d'amplitude du pont $A = 0\text{m}$, on obtient un point de poser parfaitement immobile. Les "vallées" qui sont fonction des mouvements du pont devraient alors disparaître et le poser ne devrait plus être qu'une question de portance, peu importe le timing.

4.3.3. Comparaison au modèle plus réaliste

La figure 4.3 est obtenue sur le même principe de simulation que précédemment (figure 4.2) mais pour des modèles hélicoptère et navire plus réalistes

4.3.3.1. Modèle hélicoptère

Le modèle d'hélicoptère est un modèle sous forme d'état de la dynamique du vol de l'hélicoptère tel que :

$$\dot{X} = AX + BU \quad (4.6)$$

Avec $X =^T (u v w p q r \phi \theta)$ le vecteur d'état (3 vitesses de translation, 3 vitesses de rotation et 2 angles d'attitude) et $U =^T (\delta_z \delta_l \delta_m \delta_n)$ le vecteur de commande (pas collectif, cyclique longitudinal/latéral et pédales). Les valeurs numériques de A et B sont obtenues par linéarisation autour d'un point d'équilibre en stationnaire. Le modèle est par la suite simplifié en appliquant la technique consistant à partitionner le vecteur d'état en états rapides / états lents (CHIDAMBARA et DAVISON 1967). On obtient alors un modèle simplifié du transfert entre la commande en pas collectif et la vitesse verticale de l'hélicoptère.

4.3.3.2. Modèle navire

Le modèle navire utilisé dans cette simulation plus réaliste est celui utilisé dans l'expérimentation reporté dans le chapitre 3 de cette thèse. Pour rappel il s'agit d'un modèle fréquentiel RAO d'une frégate de type Lafayette.

4.3.3.3. Paramètres de la simulation

Les paramètres de la simulation sont fixés de façon à permettre la comparaison avec la simulation précédente. L'altitude initiale simulée à $t = 0\text{s}$ est de 5m et la vitesse

initiale à $t = 0s$ de $0m.s^{-1}$ dans le repère terrestre. L'hélicoptère est parfaitement stationnaire dans le repère terrestre tout au long de la simulation. La simulation dure 14s avec un pas de temps de 0.1s. Ici nous ne simulons pas une gamme de portances possibles comme dans la simulation précédente mais une gamme de positions possibles de la commande de pas collectif. Cette gamme de positions est normalisée autour de 0 (référence de l'équilibre initial) et s'étend de -0.73 à 0.27 avec un pas de 0.001.

4.3.4. Résultats modèle plus réaliste

Le résultat de la simulation numérique est présenté à la figure 4.3. La comparaison qualitative avec la figure 4.2 souligne une morphologie commune, constituée de "vallées" de faibles vitesses d'impact en alternance avec des "crêtes" de vitesses d'impact plus élevées. Deux différences notables peuvent être soulignées. Premièrement, l'espacement entre les crêtes et vallées est moins régulier en simulation plus réaliste. Ceci est sans nul doute le fait des mouvements du pont plus irréguliers que le modèle de navire plus réaliste implique. Deuxièmement, le modèle simplifié semble à première vue sur-estimer la vitesse d'impact comme en témoigne la plus large aire grisée sur la figure 4.2 comparée à la figure 4.3 dont les couleurs tirent d'avantage vers le vert et rouge (vitesses d'impact plus basses).

Globalement les modèles simplifiés semblent capturer les propriétés principales des possibilités d'appontage mais nous devons garder à l'esprit que des différences existent quant à l'estimation de l'intensité de l'énergie à l'impact, ainsi que la régularité à laquelle apparaissent des possibilités de poser (vallées). La section suivante a pour but de simuler les possibilités d'appontage lorsqu'un pilote couple les déplacements verticaux de son hélicoptère avec ceux du navire, sur la base des modèles simplifiés présentés aux équations 4.1, 4.2, 4.3 et 4.4.

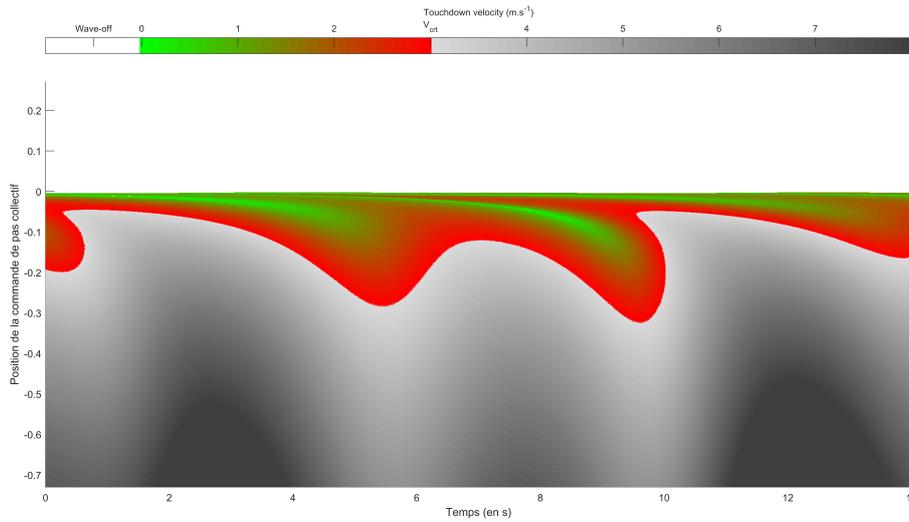


FIGURE 4.3. – Simulation des possibilités d'appontage pour un hélicoptère modélisé sous forme d'états linéarisés autour d'un point d'équilibre en stationnaire. L'hélicoptère est en stationnaire dans le repère terrestre à 5m, à la verticale d'un navire oscillant suivant un modèle fréquentiel RAO

4.3.5. Simulation de la synchronisation hélicoptère - navire

4.3.5.1. Paramètres de la simulation

Afin de pouvoir comparer les simulations obtenues dans cette section à celles réalisées dans la section 4.3.2 les modèles hélicoptère et navire, ainsi que les paramètres d'oscillation A et f , la masses m et la gamme de portances disponibles restent inchangées. A la différence de la première simulation, en revanche, l'hélicoptère ne maintient pas un stationnaire absolu dans le référentiel terrestre mais dans le référentiel du navire. Il s'agit d'un stationnaire parfait relativement au navire. Ainsi à chaque pas de temps on obtient les vitesses et positions initiales à partir desquelles sera calculée la dynamique possible de l'hélicoptère par :

$$\begin{cases} Z_{h_t} = Z_{n_t} + Z_{rel} \\ V_{h_t} = V_{n_t} \end{cases} \quad (4.7)$$

Avec $Z_{rel} = 5m$ l'altitude relative de l'hélicoptère par rapport au pont.

4.3.6. Résultats simulation synchronisation

La figure 4.4 présente le résultat de la simulation en couplage hélicoptère navire. La comparaison qualitative avec la figure 4.2 nous permet de souligner que la synchronisation a pour effet de "redresser" les vallées de faibles vitesses d'impact. En effet ces dernières paraissent nettement plus verticales sur la figure 4.4. En revanche,

une conséquence de cette stratégie est que la portance permettant de regagner de l'altitude par rapport au pont varie au cours de la simulation. Par exemple cette portance limite est d'environ 105 KN à $t = 2s$ et d'environ 98 KN à $t = 4s$. Enfin il semble à première vue qu'il n'y ait aucun effet de la synchronisation sur la chaleur moyenne du graphique, c'est-à-dire que la moyenne des vitesses à l'impact possibles semblent équivalentes entre la figure 4.2 et la figure 4.4.

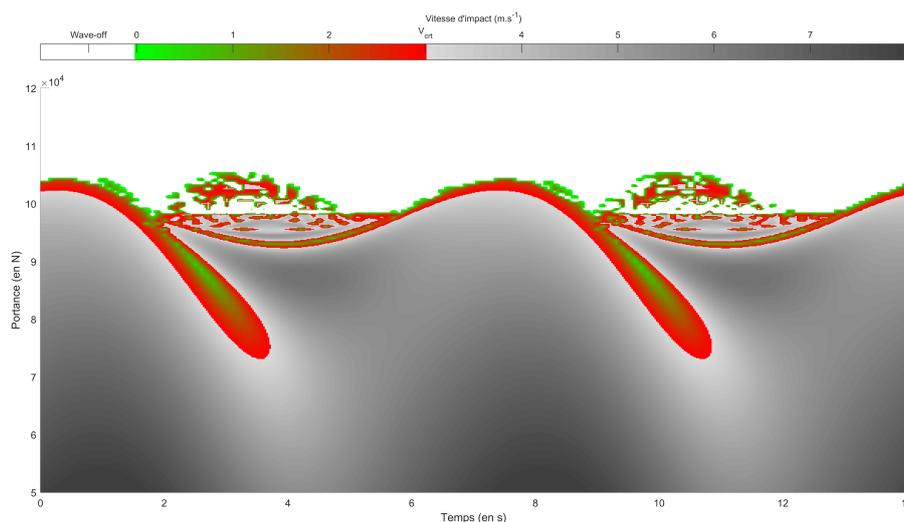


FIGURE 4.4. – Simulation des possibilités d'appontage pour un hélicoptère de 10 tonnes en stationnaire relatif au navire à 5m, à la verticale d'un navire oscillant à une amplitude de 2.5m et une fréquence de 0.14Hz

4.3.7. Comparaison stratégie de couplage et stationnaire absolu

Afin d'approfondir la comparaison entre les paysages de possibilités d'appontage obtenus en simulant une stratégie de couplage et ceux obtenus lors d'un stationnaire dans le référentiel absolu, nous pouvons mesurer et comparer la chaleur moyenne des paysages. Cette chaleur moyenne est en fait simplement capturée par la moyenne des vitesses de poser présentées dans chacun des graphiques. Nous comparons cette chaleur dans le cas d'un stationnaire absolu maintenu à 5m dans le référentiel terrestre (figure 4.2) et dans celui d'une stratégie de couplage maintenant une distance relative au pont de 5m (4.4). Nous pensons que ces paysages sont comparables car l'altitude moyenne relative entre l'hélicoptère et le pont est identique dans ces deux cas (l'hélicoptère oscillant sur deux cycles complets, l'équation 4.5 permet de déterminer que l'altitude moyenne relative = 5m dans les deux cas).

Chaleur moyenne La chaleur pour un stationnaire absolu à 5m est de $3.51 m.s^{-1}$. La vitesse critique identifiée au chapitre 2 ($3 m.s^{-1}$) est supérieure à cette chaleur totale. Ainsi en moyenne l'appontage sûr n'est pas permis ici. Il en va de même dans le cas où une stratégie de synchronisation est simulée à 5m d'altitude relative. Dans ce cas la chaleur moyenne est de $3.84 m.s^{-1}$. Cette augmentation de la chaleur totale pour une stratégie de couplage suppose qu'elle n'est pas une stratégie aussi bénéfique pour l'appontage qu'une stratégie de maintien du stationnaire absolu.

Disponibilité du pont Ces observations sont confirmées lorsqu'on mesure la disponibilité du pont, c'est à dire la fréquence à laquelle la vitesse d'impact est inférieure à la vitesse critique supportable par les pilotes et l'hélicoptère. En effet, dans le cas d'un stationnaire absolu à 5m d'altitude, 42.54% des vitesses d'impact sont inférieures à la vitesse critique. Ce chiffre chute à 33.36% pour une stratégie de couplage. En moyenne, un pilote appontant au hasard aurait donc logiquement moins de chances de succès que d'échec. La comparaison de ces deux valeurs confirme qu'une stratégie de synchronisation n'est pas meilleure que de maintenir un stationnaire absolu à 5m d'altitude (relative et absolue respectivement), que ce soit du point de vue de la chaleur moyenne ou de la disponibilité du pont d'envol.

Distribution des vitesses d'impact possibles Afin d'approfondir notre analyse nous avons exploré comment se répartissaient les vitesses d'impact dans les paysages de possibilités. La figure 4.5 illustre la distribution des vitesses d'impact pour des paysages d'appontabilité issues de simulation d'une stratégie de couplage maintenue à 3m et 5m de distance relative au pont — et pour un paysage issu de simulation d'un maintien de stationnaire à 3m et 5m dans le repère absolu. On peut observer sur cette figure que les vitesses d'impact possibles qu'offre une stratégie de couplage sont bien plus équitablement réparties en stationnaire absolu qu'en couplage. De plus l'amplitude de la gamme de vitesses d'impact possibles est réduite en couplage comparé au stationnaire absolu. Il apparaît en effet, que la mise en place d'une stratégie de couplage a pour effet de réduire l'amplitude des vitesses d'impact possibles, en d'autres termes, ces vitesses d'impact possibles s'homogénéisent. De plus, la comparaison entre les cas d'altitudes de maintien du stationnaire (comparaison A-B) illustre que cette homogénéisation est d'autant plus forte que l'hélicoptère se rapproche du pont d'envol. Enfin, ces vitesses d'impact possibles se rapprochent de la valeur critique limite permettant un poser sûr (v_{crit}) lorsque l'altitude décroît, ce qui laisse à penser que lorsque l'altitude est suffisamment réduite la disponibilité du pont explose et devient supérieure en situation de couplage. De même la chaleur moyenne du paysage de possibilités devrait diminuer suivant le même principe et favoriser une stratégie de couplage. Ainsi, ces observations nous laissent à penser que plus l'hélicoptère va se rapprocher du pont d'envol plus une stratégie de couplage sera bénéfique en comparaison à un stationnaire absolu, du point de vue de la chaleur et de la disponibilité du pont d'envol, et devrait donc être privilégiée.

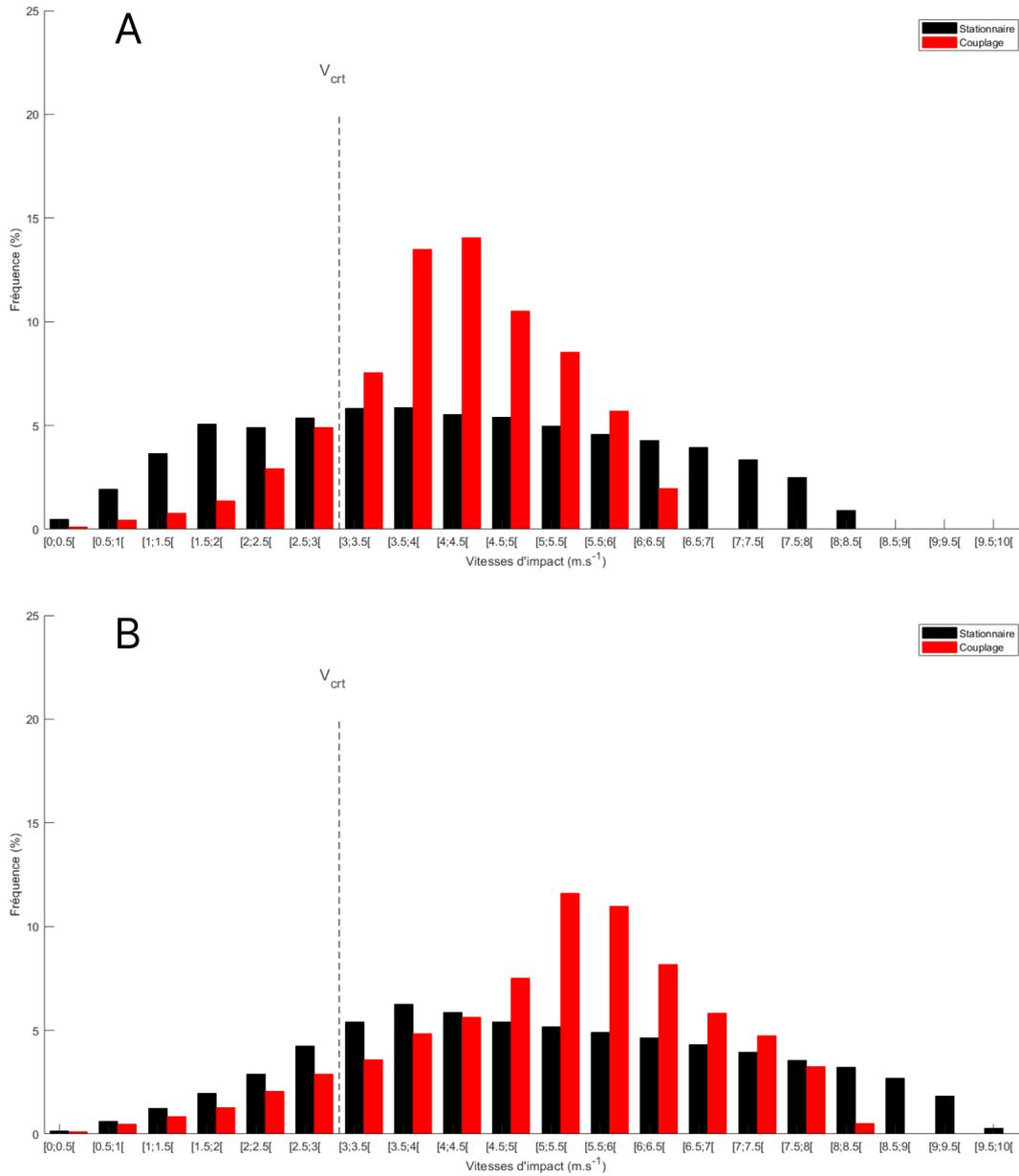


FIGURE 4.5. – Distribution des vitesses d'impact constituant les paysages d'appon- tabilité pour un stationnaire absolu dans le repère terrestre (noir) et un stationnaire relatif (rouge) maintenus à 3m (A) et 5m (B). V_{crit} est la vitesse critique au delà de laquelle le poser sûr n'est plus permis.

4.4. Discussion et conclusion

Dans cette partie nous avons modélisé la dynamique de l'hélicoptère et du navire. Cette modélisation nous a permis de déterminer la vitesse relative lors du poser de

l'hélicoptère sur le navire en fonction de la gamme de portances dont dispose le pilote à tout moment. Cette vitesse relative est déterminante de l'énergie à l'impact et donc de la sécurité des pilotes lors de l'appontage. En effet, il convient au pilote d'appliquer la portance qui lui permettra de poser avec la vitesse d'impact relative inférieure à la valeur critique assurant la sécurité lors du contact avec le pont. Il s'agit donc de vitesses d'impact possibles que permettent d'atteindre les portances possibles dépendant elles-mêmes des caractéristiques de l'hélicoptère. Ainsi le succès de la manoeuvre repose sur l'application de la portance adéquate à l'instant adéquate parmi toutes les portances et instants possibles. Le paysage de possibilités d'appontage tel que nous l'avons représenté capture ce dilemme, cette espace de problème et permet de l'étudier. En d'autres termes, ces paysages représentent ce qui est permis, offert (au sens *afford*) et capture donc l'affordance d'*appontabilité*, déterminant s'il est possible de poser en sécurité. Enfin, nous avons comparé les paysages issus du modèle simplifié (modèle hélicoptère de type portance/gravité et modèle navire purement sinusoïdal) à ceux issus d'un modèle plus réaliste (modèle hélicoptère linéarisé autour d'un point de vol et modèle navire issu de RAO). Cette comparaison nous a permis de souligner la proximité des modèles et d'apprécier les approximations liées à la simplification. Pour finir nous avons simulé une stratégie de couplage hélicoptère - navire qui nous a permis d'apprécier l'intérêt d'une telle stratégie.

4.4.1. Intérêt d'une stratégie de couplage

A première vue l'intérêt d'une stratégie de synchronisation ne réside pas dans la simplification du paysage de possibilités ou la diminution de l'énergie relative dans le système hélicoptère - navire. En effet, la chaleur (moyenne des vitesses à l'impact pour tout le paysage de possibilités) n'est pas réduite par une stratégie de couplage en comparaison à un stationnaire dans le repère terrestre. De même, la disponibilité des fenêtres d'appontage est comparable. Cependant nous avons pu observer que les "vallées" correspondant aux moments où les portances résultent en des vitesses à l'impact minimales semblent "redressées" par une stratégie de couplage, en comparaison à une stratégie de stationnaire dans le repère terrestre. Cela signifie qu'à un instant donné les portances disponibles résultent en des vitesses à l'impact plus homogènes lorsqu'une stratégie de couplage est mise en place. L'analyse des distributions des vitesses d'impact possibles supporte cette observation, puisqu'elle met en évidence une gamme de vitesses possibles moins amples, plus regroupée et donc plus homogène en stratégie de couplage. Il peut donc s'agir d'une stratégie efficace pour simplifier le problème auquel sont confrontés les pilotes. En effet lorsqu'une telle stratégie est mise en place, le problème n'est plus d'identifier le moment opportun *et* la portance appropriée simultanément pour se poser. Puisque les vitesses à l'impact pour différentes portances à un instant t s'homogénéisent lors du couplage, le choix de la portance adéquate est donc moins déterminant de la réussite de la manoeuvre. Ainsi la réussite tient essentiellement à la détection du timing auquel le poser va être déclenché. Dans cette mesure la stratégie de couplage peut être perçue comme une stratégie efficace pour simplifier le problème auquel les pilotes sont confrontés. Enfin,

les distributions des vitesses d'impact possibles suggèrent que cette stratégie devrait d'autant plus être mise en place que l'hélicoptère se rapproche du pont d'envol. Cette hypothèse est à considérer au regard des résultats obtenus au chapitre 3 de cette thèse, qui montrent que le couplage est progressivement mis en place et se renforce au cours de la manoeuvre, lorsque l'hélicoptère se rapproche du pont. Elle permettrait également d'expliquer pourquoi le couplage est bénéfique pour la sécurité de l'appontage du point de vue de la vitesse d'impact lors du poser. Tester cette hypothèse expérimentalement est une direction à envisager.

4.4.2. Perspectives de simulations futures

Dans cette étude de modèles nous avons simulé une stratégie de couplage parfaite, c'est-à-dire que les déplacements de l'hélicoptère égalaient parfaitement ceux du navire (i.e., pas de décalage de phase, et fréquences et amplitudes identiques entre les deux signaux). Il semble que cette stratégie soit bénéfique pour la sécurité de la manoeuvre, certainement car elle permettrait de simplifier le problème du pilote (cf section 4.4.1). Cependant, nous pouvons nous demander s'il existe un décalage de phase de couplage optimal, c'est-à-dire un éventuel retard entre les déplacements du navire et ceux de l'hélicoptère qui résulteraient en un paysage de possibilités d'appontage d'autant plus simplifié. La simulation de paysages de possibilités pour différentes phases de couplage hélicoptère-navire pourra aiguiller cette réflexion. Quantifier le décalage de phase éventuellement observé entre les signaux du navire et de l'hélicoptère au chapitre 3 et les comparer à l'optimal simulé révélera peut-être la capacité des pilotes à converger vers cet optimal. De plus, la diversification des cas devrait nous éclairer sur les bénéfices d'une stratégie de couplage. Par exemple, comparer le couplage et le stationnaire absolu pour des altitudes relatives et absolu plus basses permettra de tester l'hypothèse que le couplage est bel est bien d'autant plus bénéfique que l'altitude se réduit, et d'éventuellement identifier à partir de quelle altitude le bénéfice de cette stratégie dépasse celui d'un stationnaire absolu. Enfin, le même raisonnement peut être appliqué pour des niveaux de mer variés et ainsi éclairer l'observation faite au chapitre 3 que la stratégie de couplage est d'autant plus mise en place que le niveau de mer augmente.

4.4.3. Augmenter le réalisme des modèles numériques

Nous avons modélisé la dynamique du navire et de l'hélicoptère de façon simplifiée. La comparaison à des modèles plus réalistes nous laisse à penser que les déductions tirées des modèles simplifiés sont satisfaisantes, du moins qualitativement valables. Néanmoins nous pouvons augmenter le réalisme de ces modèles en y incluant des perturbations aérologiques et en relâchant les degrés de liberté afin d'intégrer des problématiques de stabilité et de précision à nos analyses. Nous pouvons légitimement nous poser la question de l'aspect que prendraient des paysages de possibilités d'appontage dans leur dimension de stabilité. Est-ce que les paysages sont comparables dans leurs dimensions d'énergie à l'impact et de stabilité? Nous pouvons émettre l'hy-

pothèse qu'une stratégie de couplage permettrait, par exemple, d'aligner les vallées de faibles vitesses d'impact et les éventuelles vallées de forte stabilité à l'impact que nous pourrions observer dans des paysages de stabilité. Le choix d'un modèle d'hélicoptère approprié pour une modélisation plus fidèle et qui relâcherait les degrés de libertés sur l'axe de roulis est difficile à établir. En effet, le domaine de la modélisation des hélicoptères est extrêmement riche et les philosophies de modélisation y sont variées. Nous pourrions par exemple nous inspirer des travaux portant sur le design d'hélicoptère qui intègrent de telles modélisations (G. D. PADFIELD et M. D. WHITE 2003; JOHNSON 1980, par exemple).

Cependant, nous pouvons d'ores et déjà identifier des critères permettant de sélectionner un modèle approprié. En effet, dans le cas présent, où le but est la formalisation de l'affordance d'appontabilité, nous pensons que des modèles qui ne sont pas déterministes, i.e, qui ne permettent pas de projeter un (unique) état future du système à partir de son état actuel ne devrait pas nous permettre de modéliser l'affordance. En effet, nous n'avons pas connaissance de formalisation d'affordance qui ne soit pas des modèles déterministes. Par exemple la formalisation de l'affordance de freinage (Brett R. FAJEN 2005) suppose un modèle de la cinématique du véhicule dont les équations déterminent l'état du système (positions et vitesses de la voiture simulée) pour n'importe quel instant. Ainsi, quelle que soit la complexité du modèle d'hélicoptère choisi, il semble judicieux de s'assurer qu'un état futur possible puisse être déterminé à partir d'un état présent observé. Des modèles probabilistes par exemple, devraient à priori être écartés.

4.4.4. Direction

Enfin, est-ce que les représentations issues de simulations présentées dans cette section peuvent capturer le comportement réel de personnes cherchant à apponter? L'expérience présentée à la section suivante vise à répondre à cette question. Pour ce faire un modèle de prise de décision et de régulation de l'appontage qui se base sur les modélisations du présent chapitre y est décrit. Elle adresse également la question de la conception et de l'évaluation d'une assistance à la prise de décision d'apponter, se basant sur les représentations du modèle d'affordance présenté dans le présent chapitre.

5. Etude empirique de la perception de l'affordance d'appontabilité

Sommaire

5.1. Objectif scientifique de la 2 ^{ème} <i>expérimentation</i>	105
5.2. Travail de l'équipe et crédits	106
5.3. Articles	106
5.4. Discussion	122
5.4.1. Réalisme et implémentations de la simulation	122
5.4.2. Réalisme et enjeux	122
5.4.3. Novices vs experts	123

5.1. Objectif scientifique de la 2^{ème} *expérimentation*

Le chapitre précédent (4) introduit la formalisation de l'affordance d'appontabilité et sa représentation par simulation numérique. Les simulations nous permettent en effet de visualiser l'affordance et sa dynamique suivant différents profils de vol. Plus précisément nous pouvons observer un paysage sur lequel il est possible d'identifier de potentiels attracteurs et repousseurs correspondant à des fenêtres de faibles et fortes vitesses d'impact respectivement. Ces repousseurs et attracteurs le sont au sens où ils modifient la dynamique du comportement. En effet, les attracteurs correspondent à des points de convergence, vers lesquels tend la trajectoire de l'agent au sein de l'espace du problème, il s'agit de son but (William H. WARREN 2006). Réciproquement, les repousseurs correspondent à des zones que l'agent cherche à éviter et à partir desquelles donc, les trajectoires divergent (William H. WARREN 2006). L'emploi des concepts de repousseurs et attracteurs est commun dans la littérature Dynamique (approches dynamique de l'action, BERNSTEIN 1966) et a permis de décrire et étudier le comportement dans des tâches variées allant de la coordination de mouvements de mains (HAKEN, J. S. KELSO et BUNZ 1985), la locomotion (DIEDRICH et WARREN JR 1998) et même la coordination entre plusieurs agents (SCHMIDT, BIENVENU, PA FITZPATRICK et al. 1998).

Ainsi, nous pouvons formuler des prédictions sur le comportement des pilotes : S'ils sont effectivement sensibles à leurs capacités d'action telles que nous les avons formalisées (affordance d'appontabilité), alors les attracteurs et repousseurs devraient influencer le comportement à l'appontage. Plus précisément, les pilotes devraient

5. Etude empirique de la perception de l'affordance d'appontabilité – 5.2. Travail de l'équipe et crédits

réguler leur poser de façon à rejoindre un attracteur (la vallée ou fenêtre de faibles vitesses d'impact) et fuir les repousseurs (les pics, ou zones de vitesses d'impact excédants les limites de sécurité). L'expérience rapportée dans cette section vise en partie à vérifier cette hypothèse. Plus exactement, nous avons dans un premier temps testé la faculté du modèle à capturer la prise de décision d'apponter ou non.

Le second objectif de l'étude est de tester la faculté d'une assistance conçue de façon à faciliter l'accès à l'affordance d'appontabilité et son évolution dynamique au cours de la manoeuvre. Pour se faire nous avons choisi d'évaluer les bénéfices de l'assistance au regard du modèle d'affordance, en terme de performance, mais également grâce à des mesures subjectives.

5.2. Travail de l'équipe et crédits

Franck, Antoine, Thomas et Julien ont tous les quatre participé à la relecture du manuscrit et m'ont suivi et conseillé tout au long de ce second travail expérimental jusqu'à sa publication. Je tiens une nouvelle fois à saluer l'expertise de Thomas concernant les aspects techniques relatives au vol d'hélicoptère. Ce second article reposant sur des formalisations mathématiques modélisant la dynamique du vol, sa maîtrise du sujet est une ressource sur laquelle il est toujours bon de pouvoir compter. Le suivi et la pertinence des remarques et conseils de Franck et Julien pour calibrer l'article aux exigences éditoriales sont également une ressource que j'ai pu apprécier pendant ce second exercice de publication. Publier est un chemin de croix sur lequel il est bon d'avoir des guides expérimentés. Pour finir, cet article n'aurait pas vu le jour sans l'expérimentation ayant fourni les données nécessaires. Cette expérimentation a vu le jour grâce aux compétences d'Antoine qui a su développer l'environnement virtuel et l'adapter aux contraintes liées à la crise sanitaire. Mon rôle au sein de l'équipe, est comparable à celui que j'ai pu remplir pour le première article. Il a été d'établir les hypothèses, déterminer la méthode d'analyse et la conduire, rédiger l'article et mener le processus de publication.

5.3. Articles

Mathieu THOMAS, Julien R SERRES, Thomas RAKOTOMAMONJY et al. « Visual augmentation of deck-landing-ability improves helicopter ship landing decisions ». In : *Scientific Reports* 13.1 (2023), p. 5119



OPEN Visual augmentation of deck-landing-ability improves helicopter ship landing decisions

Mathieu Thomas^{1,2✉}, Julien R. Serres², Thomas Rakotomamonjy¹, Franck Ruffier² & Antoine H. P. Morice²

When attempting to land on a ship deck tossed by the sea, helicopter pilots must make sure that the helicopter can develop sufficient lift to be able to safely touchdown. This reminder of affordance theory led us to model and study the affordance of deck-landing-ability, which defines whether it is possible to land safely on a ship deck depending on the helicopter's available lift and the ship's deck heave movements. Two groups of participants with no piloting experience using a laptop helicopter simulator attempted to land either a low-lifter or a heavy-lifter helicopter on a virtual ship deck by either triggering a pre-programmed lift serving as the descent law if it was deemed possible to land, or aborting the deck-landing maneuver. The deck-landing-ability was manipulated by varying the helicopter's initial altitude and the ship's heave phase between trials. We designed a visual augmentation making visible the deck-landing-ability, and thus enabling participants to maximize the safety of their deck-landing attempts and reduce the number of unsafe deck-landing. The visual augmentation presented here was perceived by participants as a means of facilitating this decision-making process. The benefits were found to have originated from the clear-cut distinction it helped them to make between safe and unsafe deck-landing windows and the display of the optimal time for initiating the landing.

Ship deck landing is a risky, demanding helicopter maneuver which involves reaching the deck despite the heaving and rolling of the ship, airwake perturbances, and often stressful contexts. The key factors underlying pilots' safety and performances have therefore been extensively studied^{1,2,3,4,5}. Several research teams (such as Tu-Deft⁶, University of Liverpool⁷, University of Southampton⁸, and DLR, the German Aerospace Center⁹) have been investigating the tremendous possibilities offered by Augmented Reality (AR) methods in order to further improve pilots' safety and their performances. However, visual Augmentations must be carefully designed to optimize their beneficial effects on human performances while preventing the occurrence of detrimental effects. In this study, we examined whether deck-landing decision-making, involving a system composed of a helicopter with a bounded action capabilities and a light, 150 m-long ship of the frigate type tossed by the sea, can be improved using a visual Augmentation (A frigate is a warship whose typical length is about 150 m (Constellation class in the US, or FREMM in France) often equipped with a landing site at the stern. These ships generally have larger heave displacements due to greater sensitivity to sea waves than heavier helicopter carriers such as NATO's LHDs (Landing Helicopter Dock) (Wasp class in the United States, or Mistral in France) for example. They are traditionally used for convoy escort.) The augmentation was designed so as to take the helicopter's action capabilities into account in order to maintain the velocity at touchdown within safe limits when landing on a moving ship. Action capability is a rich and central concept in the field of ecological psychology, which is linked to affordance theory¹⁰, referring to Gibson's view in the field of perception and action, according to which, the object of perception are possibilities for action. What actions are afforded to an agent in a given situation emerges from the agent's (e.g., the pilot's) relational properties with its environment (e.g., a helicopter / ship system)¹¹. The actions afforded to a pilot depend here on both the relevant environmental properties (such as a helicopter's ability to generate lift, its relative altitude with respect to the deck), and the relevant pilot's properties (such as injuries preventing them from grasping the stick). In this study, a helicopter's capability to generate lift, along with the helicopter—to—ship relationships (helicopter's relative altitude and the relative phase of the deck oscillation) were manipulated in order to test the deck-landing-ability affordance. It is worth noting here that the concept of affordance covers more than just a helicopter's capabilities. This point is critical to understanding how useful

¹ONERA, DTIS, Salon, Cedex Air, 13661 Salon-de-Provence, France. ²Aix-Marseille University, CNRS, ISM, 13009 Marseille, France. ✉email: mathieu.thomas.phd@gmail.com

5. Etude empirique de la perception de l'affordance d'appontabilité – 5.3. Articles

the concept of affordance can be for designing an Augmentation, which has been previously acknowledged in the field of Ecological Interface Design (EID)¹².

Assisting helicopter deck-landing: content and structure of the interface. The Ecological Interface Design framework (EID) might provide frugal solutions for designing visual Augmentations for helicopter pilots. EID has proved to be a means of improving levels of performance and safety in a large variety of activities (such as robot teleoperation¹³, missile and naval missile control^{14,15}; military mission planning^{16,17}), as well as enhancing aircraft pilots' awareness of terrain^{18,19}, their control of flight path and speed^{20,21}, their monitoring of aircraft separation and conflict resolution²², helicopters' ship deck landing²³, helicopters' obstacle avoidance²⁴, and other tasks (for a review, see²⁵).

According to the principles enacted by the EID framework, the affordances of the work domain determine the content and structure of an interface¹². The method used to identify what affordances are relevant to pilots requires first identifying the goals pursued by pilots when landing a helicopter on the deck of a ship. Previous task analyses^{1–4} have shown that pilots aim to land with a sufficient level of accuracy on the target, with enough stability to prevent rollovers, and a touchdown velocity (V_{td}) below a critical velocity ($V_{crit} = 3 \text{ m s}^{-1}$)⁴ which would otherwise risk damaging the structure of the helicopter²⁶ and injure the rotorcraft crew²⁷. It is secondly necessary to identify the resources with which helicopter pilots can achieve those goals. Decision-making processes resulting in deck-landing attempts appear to be closely linked to the vehicle's action capabilities, much like other maneuvers involving motorized vehicles. For instance, drivers regulate their braking in reference to their braking capabilities^{28,29}. In addition, the possibility of overtaking a leading car while avoiding oncoming traffic is perceived by taking the maximum velocity³⁰ and the maximum acceleration of the driven car into account³¹. Drivers are even able to simultaneously perceive their crossing and braking possibilities in order to safely approach an intersection³². The possibility of safely landing on a ship's deck can be broadly compared with Fajen's affordance model for braking when driving²⁸. Braking consists in decelerating horizontally, whereas deck-landing consists in accelerating vertically. Both tasks require regulating the vehicle's acceleration toward a target velocity so as to stop in front of an obstacle when driving and with a $V_{td} < V_{crit}$ when deck-landing. Drivers control a car's brakes with pedals, whereas pilots control a helicopter's lift with the collective stick. A car's braking equipment (e.g., disc or shoe brakes and tires) determines the car's deceleration, whereas a helicopter's rotor and engine determine the helicopter's vertical acceleration (i.e., its lift). While landing on the deck may seem different from automobile braking because the ship's deck may be tossed about by the waves of the sea, such movements of the target may also be encountered in actual driving situations. The main difference is the need for pilots to couple the vertical motions of their helicopter with the sinusoidal motion of the ship's deck in order to keep the future V_{td} below a certain threshold value V_{crit} by controlling the current lift of the helicopter ($L_{current}$). This is expressed in Eq. (1), which describes the simplified kinematics of a vertically accelerating helicopter landing on a ship's deck moving with a purely sinusoidal heave:

$$V_{td} = V_{current} + \left(\frac{L_{current}}{m} - g \right) \Delta t - A2\pi f \cos(\phi_{current} + 2\pi f \Delta t) \quad (1)$$

where m is the helicopter's mass, g is the gravity set at 9.81 m.s^{-2} , A and f are the ship's oscillation amplitude and frequency, respectively, $\phi_{current}$ is its current phase and Δt is the time remaining before touchdown. A helicopter's lift capabilities depend on the helicopter model (especially on the engine's characteristics), the load carried (e.g., the weight of the fuel, onboard passengers, etc.), and the atmospheric conditions. Equation (1) shows how pilots can control $L_{current}$ during the descent to deck with a safe V_{td} . Equation (1) describes a helicopter's deck-landing-ability. The Eq. (1) will be used as a model of the affordance of deck-landing-ability in the present study. For the sake of completeness, it should be noted, however, that the affordance of deck-landing-ability may be determined by additional constraints, such as the type of control available to the pilot (e.g., a stick or a wheel) and his ability to use them (e.g., the pilot's strength to overcome stick resistance).

As with other affordance models³³, the model of deck-landing-ability can help to understand both the decision-making involved in the deck-landing maneuver and the regulation of this maneuver. Following this model, pilots' decision-making would involve deciding to deck only if they could trigger a lift resulting in an acceleration yielding to reach the deck with $V_{td} < V_{crit}$. This lift could be labelled ideal, to mimic Fajen's car's ideal deceleration (i.e., the deceleration which, if kept constant, would make a car stop at the target) since it refers to any lift which, if kept constant, would make a helicopter reach the deck with a safe relative velocity $V_{td} < V_{crit}$. As long as this ideal lift is within the helicopter's range of lift capabilities (i.e., ideal lift < maximum lift), then safe deck-landing will be possible and pilots can trigger the deck-landing maneuver. Following again this model, pilots would have to regulate the lift to nullify the difference between the helicopter's current and ideal lifts before the ideal lift exceeds the maximum lift. As can be seen in Fig. 1, safe deck-landing (the colored area) varies with time and depends on the helicopter's range of lift capabilities. This means that to complete a safe deck-landing maneuver, pilots must apply the appropriate lift at the appropriate moment in time.

As this affordance-based model for deck-landing-ability is a new formalization, it was proposed in the present study to start testing its relevance to understand participants' decision-making to deck. We therefore designed a judgment task in which participants could not regulate the helicopter's lift but were allowed to trigger a single lift value $L_{attempt}$ by pressing a button if and when they judged the deck-landing to be possible. First, this single lift value had implications for the experimental task. It raised the question as to whether or not participants judged the deck-landing to be possible if $L_{attempt}$ was to be applied to the helicopter. In our judgment task, the ship underwent a heave motion that made the affordance of deck-landing-ability dynamical, thus preserving an essential feature of the real world. The possibility of deck-landing appeared or vanished throughout a trial, as can be seen in Fig. 1. Participants therefore had to continuously distinguish between safe and unsafe deck-landing

5. Etude empirique de la perception de l'affordance d'appontabilité – 5.3. Articles

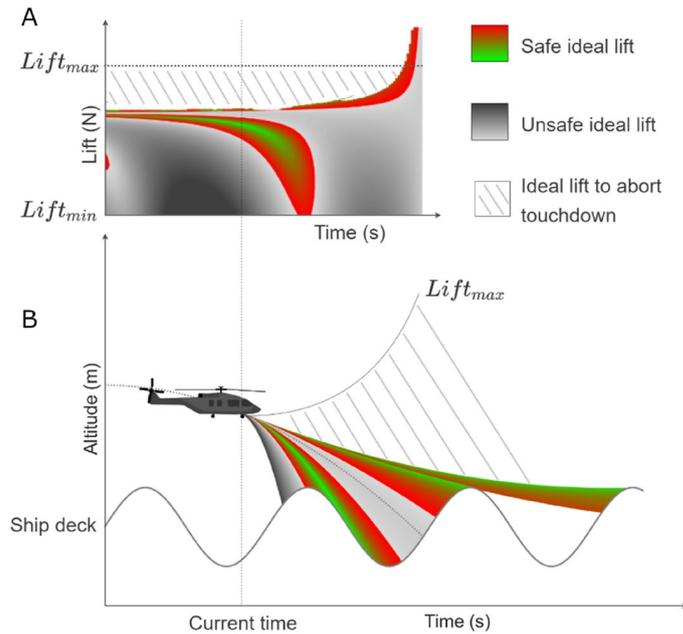


Figure 1. Numerical simulation of the consequences of the time-dynamics of the affordance of deck-landing-ability on (A) the future velocity at touchdown (V_{td}) depending on the applied lift (where $Lift_{min}$ is the minimum lift a helicopter can reach and $Lift_{max}$ is the maximum lift pulling the helicopter upward), and on (B) the helicopter's trajectory relative to the ship's deck. (A) The applied lift can belong to three areas in the figure. When located in the white area, it rules out landing on the ship (i.e., no deck-landing should be attempted) and it is recommended to abort the deck-landing maneuver. When the lift corresponds to the colored areas, it corresponds to ideal lift values compatible with landing with $V_{td} < V_{crt}$ (i.e., with safe deck-landing). Green to red colors encode the distance from V_{td} to V_{crt} . Several colored areas are presented here over time, as successive ship's heave movements may give other possibilities for landing with $V_{td} < V_{crt}$. When the lift is located in gray areas, it leads to land with $V_{td} > V_{crt}$ (i.e., unsafe deck-landing). White areas show lift which lead to avoid any contact with the deck. The bottom panel shows the corresponding helicopter trajectories relative to the ship deck's vertical heave in the case of the three scenarios.

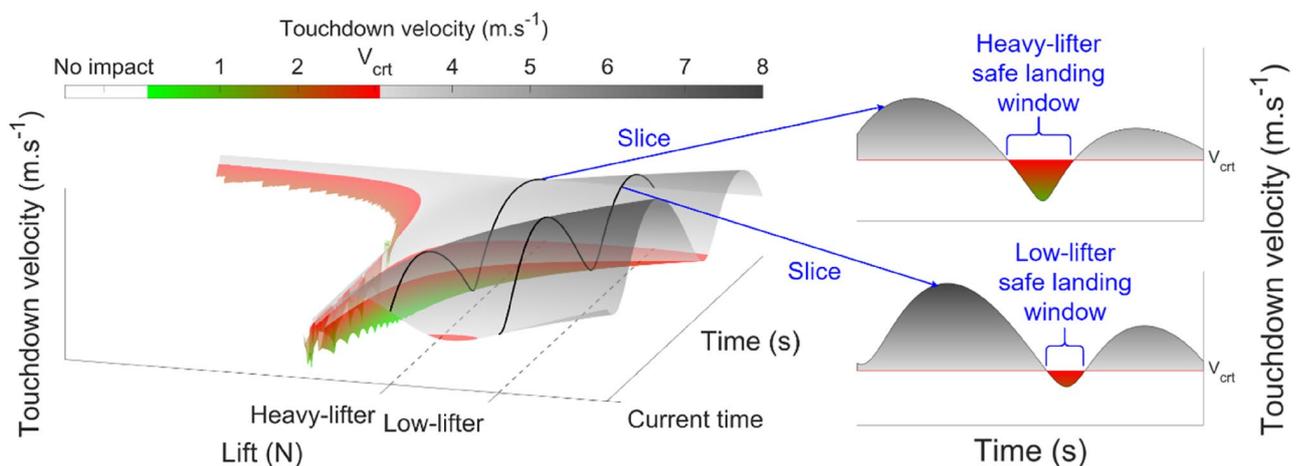


Figure 2. Relationship between the 3-D view of the deck-landing-ability landscape and the design of the visual Augmentation. The 3-D landscape confirms that V_{td} changes with time as a function of the ship's heave movements, but that it also depends on the lift applied to deck. When freezing the lift capabilities at a single $L_{attempt}$ value during the descent (using either Heavy-Lifter or Low-Lifter helicopters), slices can be extracted from the 3-D landscape and presented in a 2-D visual Augmentation. The 2-D visual Augmentation makes visible windows for safe deck-landing as colored valleys, during which deck-landing should be triggered so that landing can be attempted with $V_{td} < V_{crt}$. The red horizontal line stands for the V_{crt} .

5. Etude empirique de la perception de l'affordance d'appontabilité – 5.3. Articles

windows in order to attempt or avoid deck-landing. Second, the single lift value had implications for the visual Augmentation design. Figure 2 shows how these safe deck-landing windows can be extracted from the landscape of possibilities presented in Fig. 1 in the case of triggering a given, single, $L_{attempt}$. Figure 2 is a 3-D view of the previous Fig. 1 in which V_{td} is shown in relief in order to highlight the dynamics of safe deck-landing windows, during which $V_{td} < V_{crt}$. The 3-D landscape clearly shows that safe windows (colored areas) occur during valleys interspersed with longer times during which V_{td} will be greater than V_{crt} (gray peaks). The width and depth of these safe deck-landing windows reflect their duration and the minimum value of V_{td} , respectively, if deck-landing had to be triggered with a single $L_{attempt}$ (on the horizontal axis). Using a single $L_{attempt}$ value is equivalent to extracting a slice along the temporal axis of the 3-D landscape. Figure 2 shows that two slices extracted from the same 3D landscape but with different $L_{attempt}$ values would have different widths and depths. We termed these two different $L_{attempt}$ “Heavy lifter” and “Low-Lifter”, with reference to the distinction in the lift capabilities (i.e., the aerodynamic force exerted by the air on the rotor) between two virtual helicopters. This illustrates thus the influence of size, engine and available payload of helicopters designed for different missions on the envelope of static and dynamic flight variables such as maximum airspeeds, accelerations, load factors, etc. In sum, different $L_{attempt}$, imply different lift capabilities of “Heavy lifter” and “Low-Lifter” helicopters. Indeed, it is common to manipulate vehicles’ capabilities to test affordance models^{28,30–32}. Decision-making outcomes are expected to follow changes in affordance. In the case of deck-landing-ability, we expected participants to trigger the landing process significantly more frequently within safe deck-landing windows, or otherwise to take the decision to abort the deck-landing maneuver.

Since Warren’s seminal work on affordance perception^{34,35}, affordances have been expressed as dimensionless quantities denoted π . Expressed this way, affordances for multiple individuals in multiple situations can be compared, despite differences between individuals or vehicles. In other words, the use of affordances in terms of dimensionless quantities can be extended to many different situations, especially ones involving various helicopter capabilities. It follows that laws for making decisions and regulating behavior based on affordance models can also be generalized. As an example, Warren³⁴ identified a so-called “critical point”, a value of π at which participants’ judgments about the task are liable to shift from possible to impossible. This is because the critical point marks the affordance’s boundary, where the affordance ceases to be possible. In the case of helicopter deck-landing, π would be the ratio between $V_{achieved}$, the velocity achieved at touchdown if $L_{attempt}$ is triggered, and the critical velocity at touchdown ($\pi = V_{achieved} / V_{crt}$). When $\pi > 1$, safe deck-landing would no longer be possible and a change has to occur in participants’ judgments: they will abort the landing more frequently than in situations where $\pi < 1$, despite the existence of any differences in the helicopter’s lift capabilities or the configuration of the helicopter with respect to the ship.

Another singularity of the value of π is termed the “optimal point”. This is the value of “best-fit affordances” to use Warren’s term, a point where agents preferably find themselves ready to perform the task. In the deck-landing situation, an optimal point will be reached when $V_{achieved} = V_{optimal}$, the minimal velocity at touchdown that can be reached during a trial. We will refer below to this optimal value of π as $\pi_{optimal}$ ($\pi_{optimal} = V_{optimal} / V_{crt}$). $\pi_{optimal}$ is optimal in the sense that attempting to deck at the moment in time when $\pi = \pi_{optimal}$ yields the maximum level of safety as regards to V_{crt} . Experimental conditions where $\pi_{optimal} > 1$ would mean that no safe deck-landing window would ever occur during the trial.

Assisting helicopter deck-landing: the form of the interface. The augmentation designed to improve deck-landing maneuvers with a single, preselected lift value will show all the appropriate times for attempting a landing within safe limits (i.e., with $\pi < 1$). To maximize safety, the visual augmentation must also indicate the optimal time for landing, defined as the moment at which π is the lowest ($\pi = \pi_{optimal}$), which means that V_{td} will be as far from V_{crt} as possible at that time.

In situations where $\pi_{optimal}$ is small and the span of time when $\pi < 1$ is long, pilots will dispose of a large, deep window for deck-landing safely. This would allow pilots to attempt a larger number of landings. Conversely, situations giving pilots little or no time to initiate a landing and/or in which the associated V_{td} s are higher (i.e., close to V_{crt}) would mean that the safe deck-landing window will be shallow and thin, or maybe even absent. The visual augmentation would allow pilots to perceive that their landing opportunities are critical or inexistent. They would then abort their landing maneuvers more serenely.

Slices extracted from the 3-D landscape (Fig. 2) can be used to design a 2-D augmentation displaying how the safe windows will evolve with time when the lifting capabilities are limited to a single $L_{attempt}$ value. Figure 3B shows the visual Augmentation designed on the basis of these slices. The presence of a small colored valley therefore enables pilots to detect the arrival in the near future of a safe deck-landing window, during which $\pi < 1$ thus making it possible to trigger a given $L_{attempt}$ allowing safe deck-landing. In addition, the width of the valley reflects the duration of $\pi < 1$, and its depth reflects the magnitude of V_{td} if $L_{attempt}$ is applied. This display will change with time, ship heave movements, lift applied and the helicopter’s rate of descent.

Aim of the study. The aim of this experiment was to determine whether participants with no piloting experience perceived with the naked eye the affordance of deck-landing-ability (defining whether or not it is possible to land safely on the deck of a ship) and whether they could benefit from an ecologically designed visual augmentation assisting them to safely decide whether to attempt or abort the ship deck-landing maneuver. A simulated view of a helicopter pilot deck-landing on a frigate from hovering to touchdown was presented on a laptop screen. A visual Augmentation was designed to show the current and future deck-landing-ability during the course of a helicopter approach, taking the maximum lifting capabilities of the piloted virtual helicopter into account. The perception of deck-landing-ability was tested by manipulating the initial configuration of the helicopter/frigate system, constituting a between-trial variable and the helicopter’s action capabilities ($L_{attempt}$)

5. Etude empirique de la perception de l'affordance d'appontabilité – 5.3. Articles

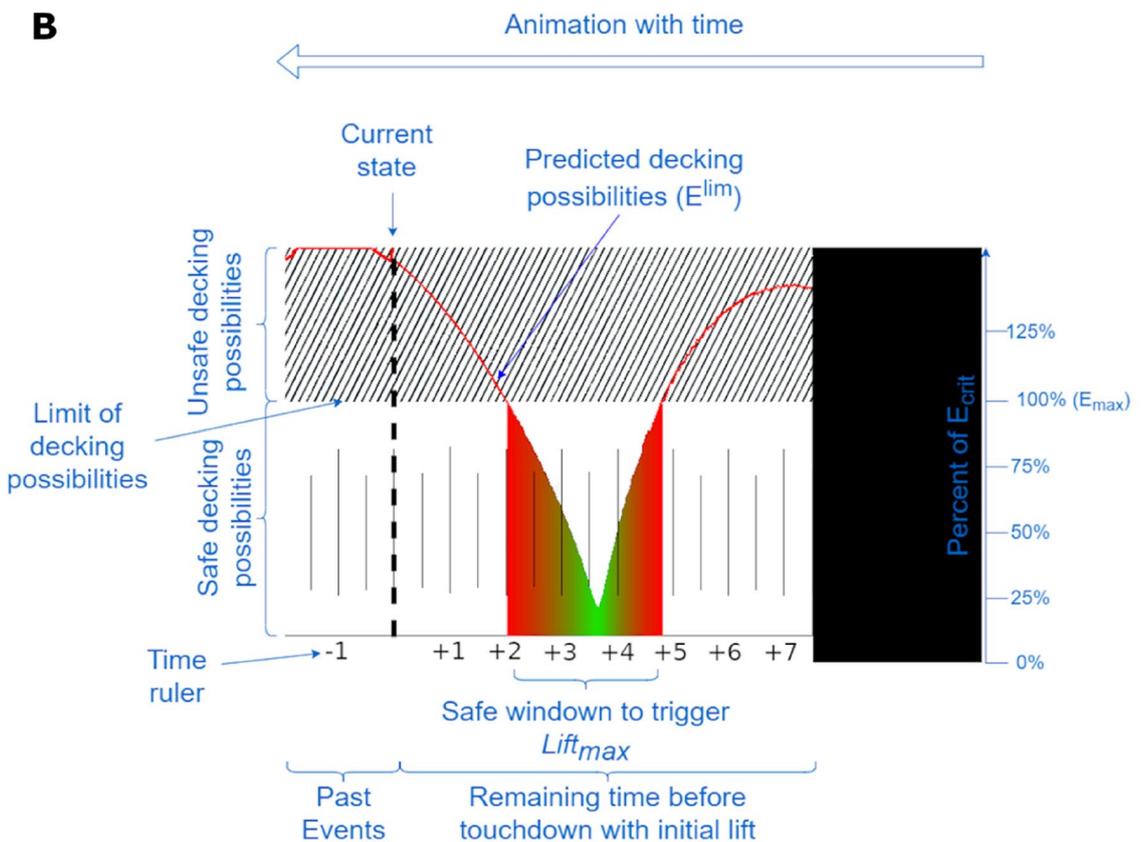
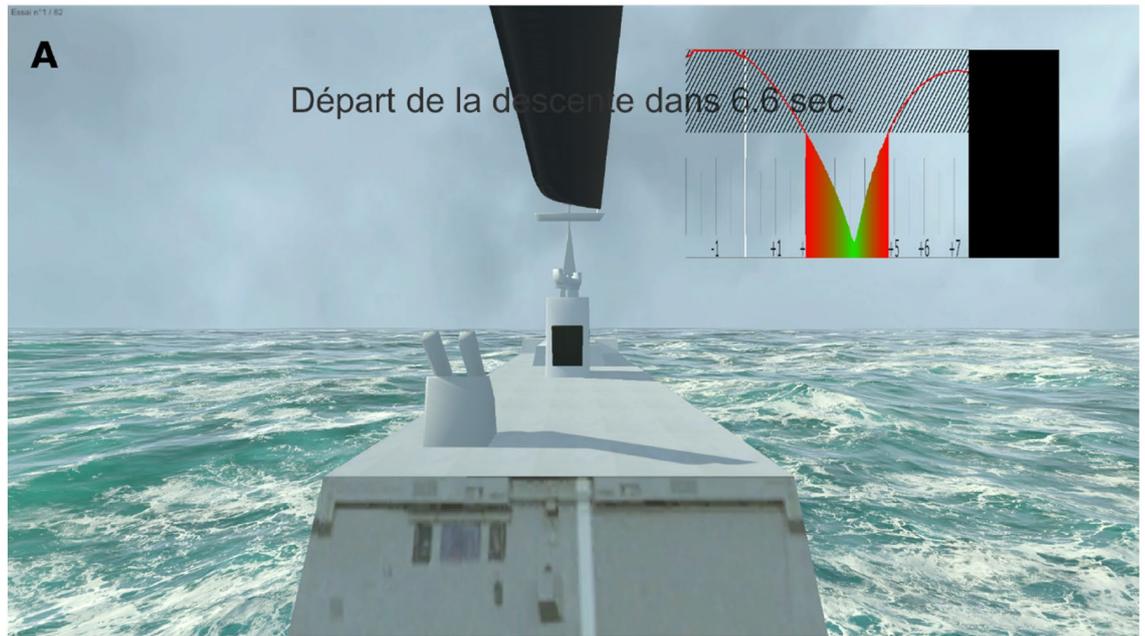


Figure 3. (A) Typical screenshot of the virtual scene during the hovering phase, including the frigate’s hangar, in front of which the ship’s deck was sitting, the top blade rotating at the top of the screen, and the Augmentation on the upper right part of the screen. The text, which was written in French, informed the participant that the initial descent was about to start in 6.6 s. (B) The visual Augmentation was designed to make visible the deck-landing-ability via the dynamics of the future touchdown velocity (V_{td}) if $L_{attempt}$ was triggered. Annotations (not shown on the screen) are presented here in blue.

5. Etude empirique de la perception de l'affordance d'appontabilité – 5.3. Articles

constituting a between-group variable. We examined not only whether participants were able to perceive their deck-landing-ability but also whether the visual Augmentation improved the safety of their deck-landing decisions. Lastly, it was proposed to assess how the Augmentation improved the participants' perception of the affordance of deck-landing-ability.

Methods

Participants. Thirteen males and sixteen females volunteered to take part in the experiment. Nine of them received course credits. Participants' mean age was 24.4 ± 3.5 years and all had normal or corrected-to-normal vision. None of them reported having acquired any experience of aircraft piloting of any kind. The participants recruited were students at the ONERA center (Salon-de-Provence, France) and the Etienne Jules MAREY Institute of Movement Science (Marseille, France) who had responded to a volunteer search advertisement. To be eligible, participants had to be right-handed, not be regular video game players, have normal or corrected-to-normal vision, and have no experience in aircraft piloting. The sample size was determined in line with³⁶ and was therefore taken to be a representative sample of young adults who were healthy but novices in the field of helicopter piloting. Participants were not informed about the aim of this study, but they were informed about the experimental procedure and signed a consent form in keeping with the requirements of the Helsinki Declaration. The experiments were performed in line with the French Public Health and APA Ethical Codes. The laptop keyboard was rigorously disinfected before each individual trial, and it was checked whether the participants were wearing masks to deal with the Covid-19 epidemic. The experiments were run from January to March 2021 at the Department of Information Processing and Systems at ONERA (Salon-de-Provence, France) and the Etienne Jules MAREY Institute of Movement Science (Marseille, France).

Apparatus. Participants sat in front of a laptop (Intel Core™ i7-9750H CPU @2.60 GHz with 8Go RAM, NVidia GeForce GTX 1050 GPU) operated by Windows 10 64-bit (Microsoft, Seattle, Washington, USA) and were immersed on the screen (35.4×19.9 cm, 1920×1080 px) on board a virtual NATO Frigate Helicopter. Pre-programmed rate of descent of the virtual helicopter could be changed by pressing keyboard keys to attempt or abort deck-landing maneuvers onto the deck of a Lafayette-type frigate. Both the flight dynamics of the virtual helicopter and the ship were computed online based on Eq. 1. The visual scene was rendered on the laptop screen with a Unity3D engine (2020.3.2.f1, Unity Technologies ApS, Unity 3D.com).

Visual scene. The visual scene mimicked scenes which would be observed by a helicopter pilot landing on the deck of a Lafayette-type frigate, except that the helicopter cockpit was not visible on the screen (Fig. 3A). On the upper part of the screen, participants could see the top blades rotating while the hangar and the deck of the frigate completely occupied most of the screen in the foreground. The values of the amplitude A and the frequency f of the ship's heave (cf. Equation 1) were always held constant at 2.5 m and 0.14 Hz, respectively. This produced a sinusoidal ship heave movement in the range of those observed under the moderate sea conditions²³, rendered here by the Crest Ocean System³⁷. A cloudy sky featured in the background.

An animated display was available in Augmentation conditions to make the deck-landing-ability visible on the upper right portion of the screen, as in a head-up display (HUD). The interface components are presented in Fig. 3B. The dynamics of the touchdown velocity V_{td} was drawn by a curve expressed in normalized units relative to the critical touchdown velocity V_{crt} , moving from right to left with time. The critical velocity V_{crt} was depicted in a plain horizontal black line. Any future touchdown velocity V_{td} below this line meant that safe deck-landing was safe, whereas those located above the line in the black hatched part corresponded to unsafe deck-landing. To show up the safe deck-landing possibilities, the area under the curve at times when $V_{td} < V_{crt}$ were colored with colors ranging from pure green ($V_{td} = 0$) to red ($V_{td} = V_{crt}$), in line with³⁸. A horizontal ruler displayed on the abscissa at the bottom of the display gave the time series in seconds. The dotted vertical line indicates the current time. Its intersection with the curve indicated the V_{td} which would be reached if $L_{attempt}$ was triggered immediately. The left part of the V_{td} curve corresponds to the past touchdown velocity, and the right part to the near future touchdown opportunity. The left edge of the black area stands for the end of the trial. The colored curve is periodically deformed with time, depending on the ship heave movements, and includes emerging and vanishing safe windows for triggering $L_{attempt}$. As the helicopter moves toward the ship, the colored curve and the black area move from right to left until the black area reaches the vertical line defining the current time.

Procedure

Task. Upon their arrival at the Lab, participants were informed that their task consisted in answering a single question: Press the "Yes" button if and when you judge that your lift capability will enable you to land safely on the ship's deck or press the "No" button as soon as you perceive that it will never be possible to deck safely". They were informed about the trial procedure and how the Augmentation worked.

Protocol. Prior to the experiment, during the calibration phase, participants performed practice trials in order to calibrate themselves with the simulation dynamics. During the experimental phase, their responses were monitored. Immediately after the end of the experimental phase, participants completed a Modified Cooper-Harper for Unmanned Vehicle Displays (MCH-UVD) questionnaire.

Unfolding of trials. The unfolding of trials (Fig. 4) was similar during both the calibration and experimental phases. Trials always started with the helicopter hovering in a stationary position for 14 s in Earth reference above the center of the ship's deck. This period corresponded to two cycles of the ship's heave and facilitated the

5. Etude empirique de la perception de l'affordance d'appontabilité – 5.3. Articles

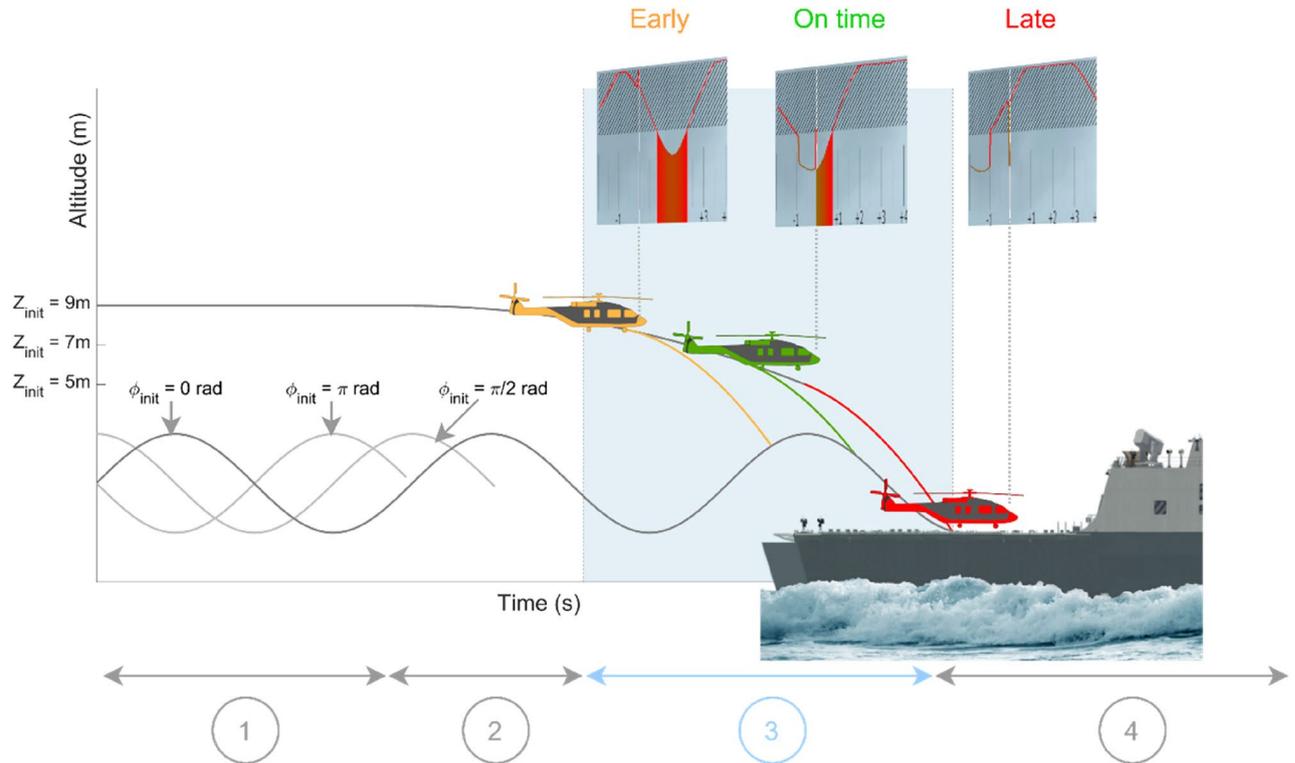


Figure 4. Unfolding of trials. (1) the helicopter hovered in a stationary position in Earth reference at an initial altitude Z_{init} . The countdown indicated the remaining time in this stationary position. (2) The helicopter slowly decreased altitude (lift is reduced to 97,119 N). A second countdown was then presented, showing, how much time was left before participants were allowed to press either the "yes" or "no" button. (3) The second countdown disappeared when it reached 0 s. and participants were then allowed to either attempt the deck-landing maneuver by pressing "yes", or abort it by pressing "no". (4) If no response occurred, the helicopter reached the deck and participants were given some feedback information to encourage them to respond in the subsequent trials. Grey arrows show the phases during which participants could not press the "yes" or "no" buttons (they were instructed not to respond during these phases, and any responses occurring during these phases were not taken into account). The light blue arrow shows the time interval during which participants were expected to produce a response.

pickup of the ship's heave amplitude, frequency and phase. During this period, the first countdown informed participants how much time remained for them to stay in the hovering mode. When this first countdown was over, the helicopter started to descend with a lift set at 97.119 N (99% of $m \cdot g$) and a second countdown started, informing participants when they would be allowed to respond. Once the second countdown was over, the helicopter would continue to descend at the same rate until the participants pressed a key. If they pressed the "Yes" key, the helicopter's rate of descent changed according to a constant $L_{attempt}$ value (90,000 N for Heavy Lifters and 80,000 N for Low Lifters) until reaching the deck. If the participants pressed the "No" key, the deck-landing maneuver was aborted, and a new trial started. If neither key was pressed, the helicopter reached the deck with its initial rate of descent.

Feedback. Participants were provided with feedback information at each trial during the calibration and experimental phases via short text messages. The first message indicated whether or not the decision to attempt or abort the deck-landing maneuver was appropriate in view of their deck-landing possibilities. The second message, which occurred whenever a deck-landing maneuver was correctly attempted, indicated whether the timing of the deck-landing attempt was early, on time or late with respect to their deck-landing possibilities. After each trial in the calibration phase, the value of the touchdown velocity was provided in addition to the second message in order to favor the calibration.

Independent variables. The calibration phase comprised 18 trials. Three combinations of initial altitudes (Z_{init}) and phases (ϕ_{init}) were used ($\{Z_{init}; \phi_{init}\} \in \{[9 \text{ m}; 0 \text{ rad}], [5 \text{ m}; \pi \text{ rad}], [7 \text{ m}; \pi / 2 \text{ rad}]\}$).

During the experiment phase, the virtual helicopter's attempt lift ($L_{attempt}$), serving as a between-group variable with two levels (80,000 N and 90,000 N), was manipulated. For this purpose, participants were randomly divided into two mixed gender groups. 15 participants were assigned to a Low-Lifter (LL, $L_{attempt} = 80,000 \text{ N}$) and the other 14 to a Heavy-Lifter (HL, $L_{attempt} = 90,000 \text{ N}$) virtual helicopter. These values were chosen to induce differences in the vertical rates of descent between HL and LL groups, which in turn would induce differences in their deck-landing-ability.

5. Etude empirique de la perception de l'affordance d'appontabilité – 5.3. Articles

We also manipulated the deck-landing-ability affordance at the start of each trial as a between-trial variable, summarized by $2 \times 8 \pi_{optimal}$ quantities ranging from 0.22 to 1.07 for the LL and from 0.03 to 1.11 for the HL group. The $\pi_{optimal}$ values used here resulted from varying 8 pairs of parameters in the initial state of the helicopter/frigate system: the initial altitudes ($Z_{init} = 5 \text{ m}, 7 \text{ m}$ and 9 m) and the initial phases of the frigate ($\phi_{init} = 0 \text{ rad}, \pi/2 \text{ rad}$ and $\pi \text{ rad}$). Since the pair [$Z_{init} = 5 \text{ m}; \phi_{init} = 0 \text{ rad}$] pair did not give a long enough descent phase (zones 2 and 3 in Fig. 4) for participants to have enough time to produce a response, this pair was not tested in this experiment. This yielded 8 conditions of deck-landing-ability for each of the two virtual helicopters.

Lastly, the availability of the Augmentation as a between-trial variable (2 modalities: Control without Augmentation and Augmentation) was manipulated. The 8 $\pi_{optimal}$ conditions were repeated 4 times in each of the 2 modalities of Augmentation availability and presented in random order, resulting in a total number of 64 trials.

Data analysis. We eliminated from the analysis all trials in which participants forgot to press a key (2.3% of the trials). The trials in which participants pressed two different keys were analyzed by analyzing the last key pressed (4.2% of the trials).

Assessing the benefits of the Augmentation: the benefits of the Augmentation were first analyzed in terms of participants' decision-making ability to distinguish between safe and unsafe deck-landing possibilities. In each trial, we either retrieved $V_{td}^{attempt}$, the touchdown velocity resulting from attempted deck-landing, or simulated a posteriori V_{td}^{abort} , the touchdown velocity that would have been reached if the maneuver had been pursued with $L_{attempt}$ at the moment when the maneuver was aborted. The benefits of the Augmentation were analyzed secondly using the Modified Cooper-Harper for Unmanned Vehicle Displays (MCH-UVD) diagnostic tool³⁹ to determine how useful the Augmentation was to the participants. The questionnaire was completed by participants after the experiments. Individual Modified Cooper-Harper ratings were converted into Z-scores before the analysis.

Assessing deck-landing-ability perception: the benefits of the Augmentation for perceiving the deck-landing-ability were analyzed by studying the effects of π -conditions on the frequency and timing of participants' deck-landing attempts. Traditionally, analyzing the perception of an affordance involves studying the parameters of a sigmoid function⁴⁰ that fits the response frequency expressed in either an extrinsic or an intrinsic unit π ^{30,31,35}. This analysis is possible as long as there is only one value of π per experimental condition, which makes for a sufficiently large total number of responses and a good balance between experimental conditions. In our model of the affordance of deck-landing-ability, the π -value varies during the course of trials, and the π -value analyzed depended on the moment when participants responded (by attempting or aborting deck-landing). The number of individual responses per π value can therefore change until it becomes unrepresentative of the actual cognitive process (i.e., an error occurring among only a few responses at a given value of π would have too high a cost). We therefore decided to run Anovas on the response frequency instead of analyzing parameters of the sigmoid functions, a valid alternative that has been previously applied in studies on affordances³⁴.

Assessing perception of the optimal timing of deck-landing-ability: the benefits of the augmentation in terms of finding the optimal timing for attempting a deck-landing maneuver were examined by computing the error between the optimal timing featuring in safe deck-landing windows and the moment at which deck-landing was attempted. Optimal timing was defined as the moment at which the deck-landing attempt would result in a minimum V_{td} , that is the moment at which the safe deck-landing window was the deepest in Fig. 3A.

Results

Attempt rates. Deck-landing attempts were first examined in order to quantify the benefits of the Augmentation under safe and unsafe deck-landing conditions. A 3-way mixed model ANOVA (2 groups [LL, HL], 8 deck-landing-ability levels [$\pi_{optimal}$], 2 Augmentation availabilities [Control, Augmentation]) with repeated measures on the $\pi_{optimal}$ was run on the frequencies of deck-landing attempts. The ANOVA showed the existence of significant main effects of both the availability of Augmentation ($F(1, 27) = 19.36, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.42$) and the deck-landing possibilities π ($F(3.51, 94.70) = 76.35, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.74$) as well as significant group \times Augmentation ($F(1, 27) = 6, p = 0.02, \eta_p^2 = 0.18$), and $\pi \times$ Augmentation availability interactions ($F(4.17, 112.49) = 27.38, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.50$). A group \times $\pi \times$ Augmentation availability interaction was also observed ($F(4.17, 112.49) = 2.96, p = 0.02, \eta_p^2 = 0.01$). The Tukey HSD post-hoc test showed that the effect of deck-landing possibilities was mostly due to significant differences in deck-landing attempts between conditions where safe windows were available (average $\pi_{optimal} = 0.24, 0.61, 0.51$ and 0.13) and those where they were not available (average $\pi_{optimal} = 1.05, 1.07; p < 0.001$) or where they were small (average $\pi_{optimal} = 0.78; p < 0.01$). These results suggest that participants' decisions to attempt or abort deck-landing depended on the availability of safe deck-landing windows during the course of a trial. The Tukey HSD posthoc tests also showed that the frequency of deck-landing attempts by the HL group was significantly reduced by the use of the Augmentation under all conditions where no safe windows were present ($\pi_{optimal} = 1.11, 1.05$ and $1.07; p < 0.001$) in comparison with the Control condition. The frequency of deck-landing attempts by the LL group was almost significantly reduced by the Augmentation when $\pi_{optimal} = 1.07$ ($p = 0.053$) and was significantly reduced in the unsafe condition where $\pi_{optimal} = 1.05$ ($p < 0.01$).

To summarize, the Augmentation was found to be most beneficial during unsafe deck-landing windows, where it decreased the number of deck-landing attempts from about 40% to less than 10% from Control to Augmentation conditions (Fig. 5). The Augmentation is also beneficial during safe deck-landing windows, where it maximizes the safety of deck-landing attempts.

Touchdown velocities. Touchdown velocity was also analyzed to investigate whether the Augmentation reduced the number of unsafe deck-landing attempts (i.e., those occurring above V_{crit}) with respect to the Control, non-augmented condition. In the Control condition, the distribution of touchdown velocities resulting from attempted deck-landing ($V_{td}^{attempt}$) represented in the form of filled bars in Fig. 6, was roughly centered

5. Etude empirique de la perception de l'affordance d'appontabilité – 5.3. Articles

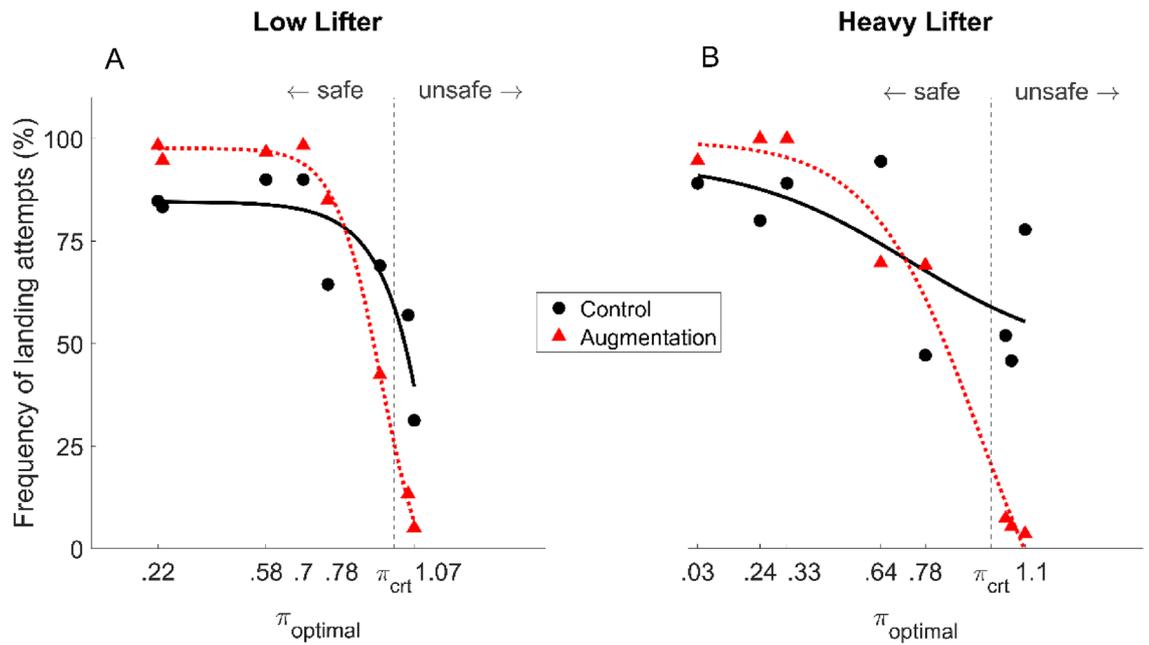


Figure 5. Inter-individual mean frequency of attempted deck-landing maneuvers expressed as a function of $\pi_{optimal}$ for Control (A, B) and Augmentation conditions (C, D) and for LL (A–C) and HL (B–D) groups. The red curve depicts the mean sigmoid function fitted on inter-individual mean frequency.

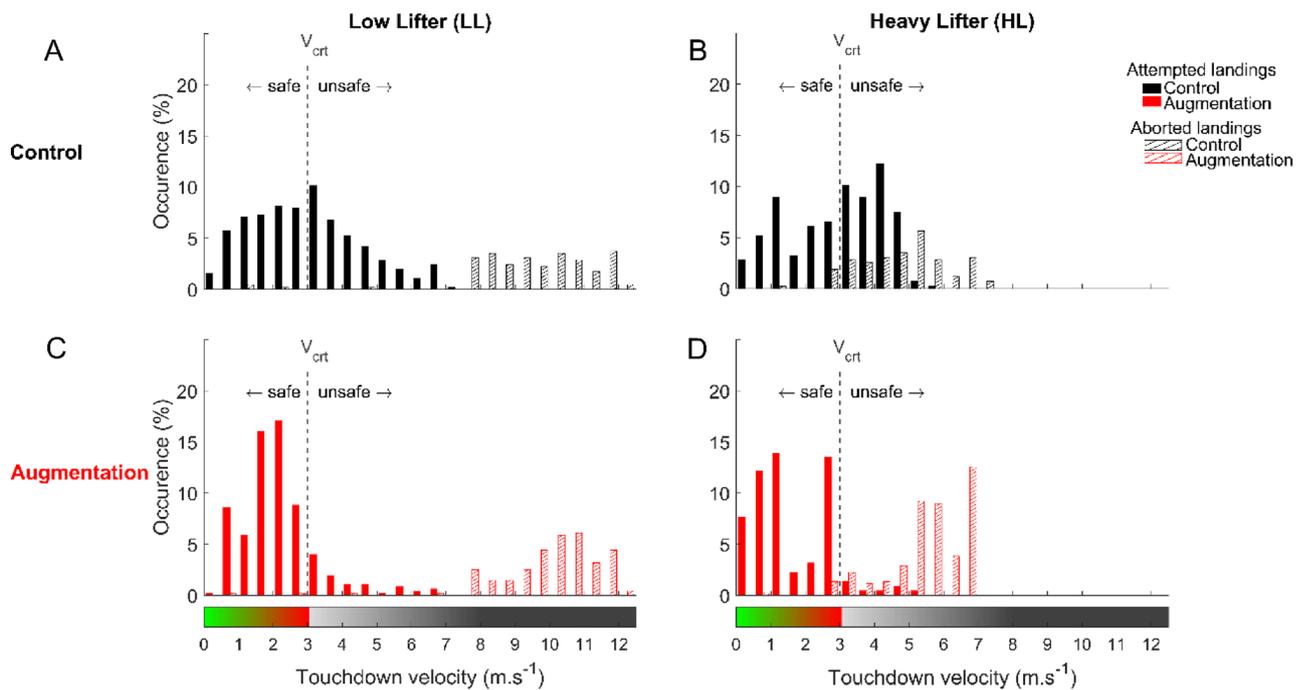


Figure 6. Distributions of touchdown velocity resulting from attempting deck-landing ($V_{td}^{attempt}$) and predicted when aborting deck-landing (V_{td}^{abort}) for Control (A, B) and Augmentation conditions (C, D) and for LL (A–C) and HL (B–D) groups. The red dotted vertical line depicts V_{crit} and separates the safe touchdown velocities from unsafe ones.

around V_{crit} . Participants therefore attempted to deck despite unsafe deck-landing conditions, with $V_{td}^{attempt} > V_{crit}$, in more than one-third of the trials (36.09 ± 15.60 and $41.50 \pm 16.28\%$ in the case of participants in the LL and HL groups, respectively). In the Augmentation condition, the distribution of $V_{td}^{attempt}$ shifted below V_{crit} . Participants therefore made few attempts resulting in unsafe deck-landing (10.80 ± 13.37 and $5.28 \pm 4.14\%$ of trials in the case of LL and HL groups, respectively). A 2-way mixed-model ANOVA (2 groups [LL,HL], 2 Augmentation availabilities [Control, Augmentation]) with repeated measures on the availability of Augmentation run on the

5. Etude empirique de la perception de l'affordance d'appontabilité – 5.3. Articles

frequency of $V_{td}^{attempt} > V_{crit}$ supported these findings by showing that the Augmentation significantly reduced the number of unsafe deck-landing attempts in comparison with the Control condition ($F(1, 27) = 112.35, p = 0.04, \eta_p^2 = 0.81$), independently of the group.

We also wondered whether the Augmentation maximized the attempts resulting in safe deck-landing maneuvers, encouraging participants to abort deck-landing maneuvers only when they were unsafe. The distribution of touchdown velocities predicted from aborted deck-landing (V_{td}^{abort}), presented in the form of hatched bars in Fig. 6, was centered well above V_{crit} in the Control and even more so in the Augmentation condition. This suggests that participants mainly aborted deck-landing when it was unsafe and that the Augmentation strengthened this phenomenon. A 2-way ANOVA with repeated measures run on the frequency of $V_{td}^{abort} > V_{crit}$ confirmed this finding by showing that the Augmentation significantly reduced the number of aborted maneuvers that would have led to a safe deck-landing in comparison with the Control condition ($F(1, 27) = 8.944, p = 0.006, \eta_p^2 = 0.24$), independently of the group.

Overall, in the Control condition, participants attempted deck-landing mainly within or near safe windows and aborted deck-landing only when it was unsafe. The Augmentation improved the safety of participants' decision-making, since deck-landing attempts were even more densely distributed within safe windows, whereas deck-landing maneuvers were aborted around higher values of V_{td}^{abort} .

Timing of decisions. The timing of deck-landing attempts was the third point analyzed in order to check whether participants' decision to deck was taken randomly or whether it might be related to the availability of safe deck-landing windows. A 3-way mixed model ANOVA (2 groups [LL, HL], 5 deck-landing-ability levels [$\pi_{optimal}$], 2 Augmentation availabilities [Control, Augmentation]) with repeated measures on the $\pi_{optimal}$ providing safe deck-landing windows (mean $\pi_{optimal} = 0.78, 0.24, 0.61, 0.51$ and 0.13) was performed on the timing of deck-landing attempts. The ANOVA shows a significant main effect of the deck-landing-ability conditions ($F(1.78, 37.42) = 144.82, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.87$) as well as a significant deck-landing-ability \times Augmentation interaction ($F(4, 84) = 30.98, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.60$). These data suggest that the timing of participants' attempts to deck was not random. Rather, the effects of the π -condition suggest that the timing of participants' decisions is organized on the basis of some property of the various π -conditions, which might be the optimal time at which $\pi = \pi_{optimal}$. According to this hypothesis, participants' decision to deck should be made in line with the optimal timing. The Tukey HSD posthoc tests support this idea, since the effect of the π -condition on the timing of attempted deck-landing in the Control condition was observed between all the π -conditions ($p < 0.01$ with all pairs) except between conditions [5 m; $\pi/2$] and [7 m; $\pi/2$] ($p = 0.79$) and between conditions [9 m; 0] and [7 m; 0] ($p = 0.83$). These pairs of conditions showed the smallest differences in the timing when $\pi = \pi_{optimal}$ ($= 0.39$ and 0.64 s between conditions [5 m; $\pi/2$] and [7 m; $\pi/2$] in groups LL and HL, respectively, and $= 0.70$ and 1.20 s between conditions [9 m; 0] and [7 m; 0] in groups LL and HL, respectively). All in all, these results suggest that large enough variations in optimal timing for attempting deck-landing would result in significant variations in the timing at which participants decided to trigger the landing, even in the Control condition. This might be explained by the fact that optimal timing and timing when there is a safe deck-landing window available are indeed linked to each other and were both taken into account here by the participants.

By focusing on the magnitude of error in the timing of deck-landing attempts, we expected to obtain further insights into the benefits of the Augmentation as a means of selecting the appropriate time at which to attempt deck-landing. A 3-way mixed model ANOVA (2 groups [LL, HL], 5 deck-landing-ability levels [$\pi_{optimal}$], 2 Augmentation availabilities [Control, Augmentation]) with repeated measures on the π -condition providing safe deck-landing windows was performed on the average individual error between the timing of deck-landing attempts and the optimal timing. The analysis showed the existence of significant effects of both the π -condition ($F(1.86, 39.04) = 7.72, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.27$) and the use of Augmentation ($F(1, 21) = 46.82, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.69$), with no significant main effects of the group ($F(1, 21) = 2.12, p = 0.16, \eta_p^2 = 0.09$). In addition, a $\pi \times$ Augmentation availability interaction was observed ($F(2.30, 48.40) = 12.55, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.37$). The results are displayed on Fig. 7. The Tukey HSD posthoc tests showed that Augmentation significantly decreased the magnitude of timing errors in the two π -conditions where the amount of time available for attempting safe landing was the shortest (i.e., $\pi_{optimal} = 0.61$ and 0.78 on average in both HL and LL groups). These results suggest that the Augmentation was a beneficial means of finding the optimal timing of deck-landing attempts.

Landscape of deck-landing-ability. The nature of the decision (to attempt or abort deck-landing), its frequency, its outcome (i.e., the velocity at touchdown) and its timing can be captured together in the landscape of deck-landing-ability shown in Fig. 8 (cf. Figure 2 for explanations). The deck-landing-ability is reflected in the width of the colored thong that stands for the duration of the safe deck-landing windows, and in the green to red colors encoding the distance of V_{td} from V_{crit} , thus showing the safety of the deck-landing attempt. The nature of the decision (attempt vs abort) is depicted in the form of symbols (circles and squares standing for attempted and aborted maneuvers, respectively), the frequency of the decision is indicated by the size of the symbol, the velocity at touchdown relative to V_{crit} is encoded by green to red colors. Lastly, the black and red colors correspond to Control (non-augmented) and Augmentation conditions, respectively. Figure 8 shows first that the Augmentation maximized the deck-landing attempts as compared with the Control condition (98% and 100% vs. 90% and 89% attempted by the groups LL and HL, respectively). Figure 8 also makes it clear that the Augmentation brings the timing of the deck-landing attempt closer to the optimal timing than in the Control, non-augmented condition, so as to keep the velocity at touchdown below V_{crit} (2.13 and 0.99 m.s⁻¹ vs. 2.24 and 3.11 m.s⁻¹ in both Low and Heavy Lifter groups).

5. Etude empirique de la perception de l'affordance d'appontabilité – 5.3. Articles

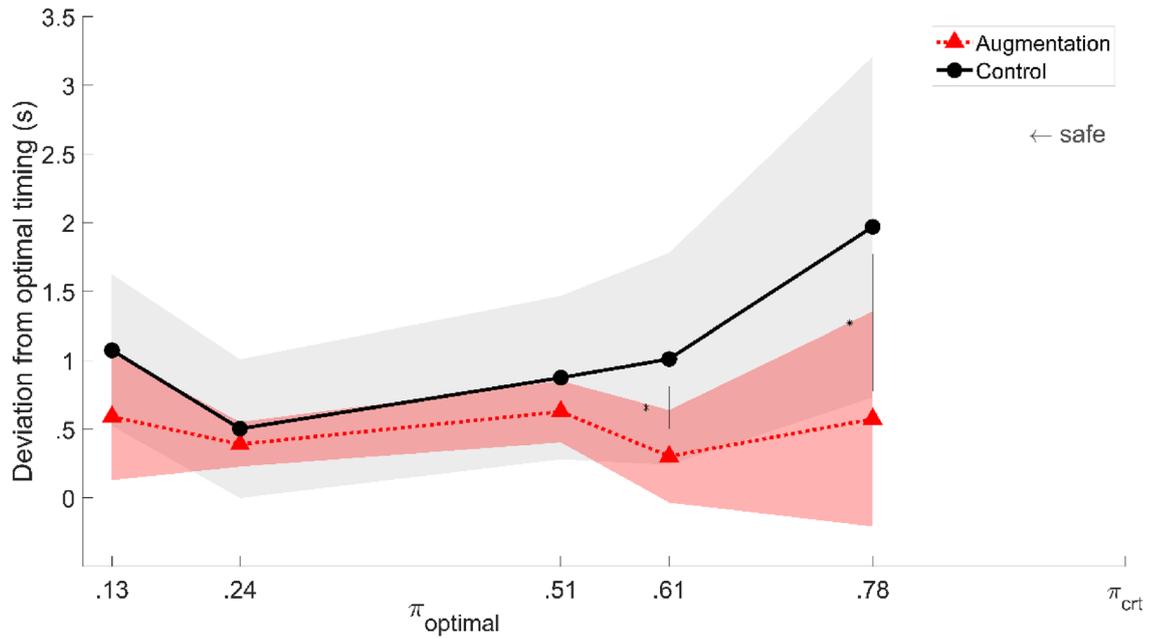


Figure 7. Inter-individual average timing error between the moment of the deck-landing attempt and the optimal moment during safe deck-landing windows as a function of $\pi_{optimal}$ in Control and Augmentation conditions (plain black and dotted red curves, respectively). Data on LL and HL groups were pooled together. The colored areas give the standard deviations of individual means.

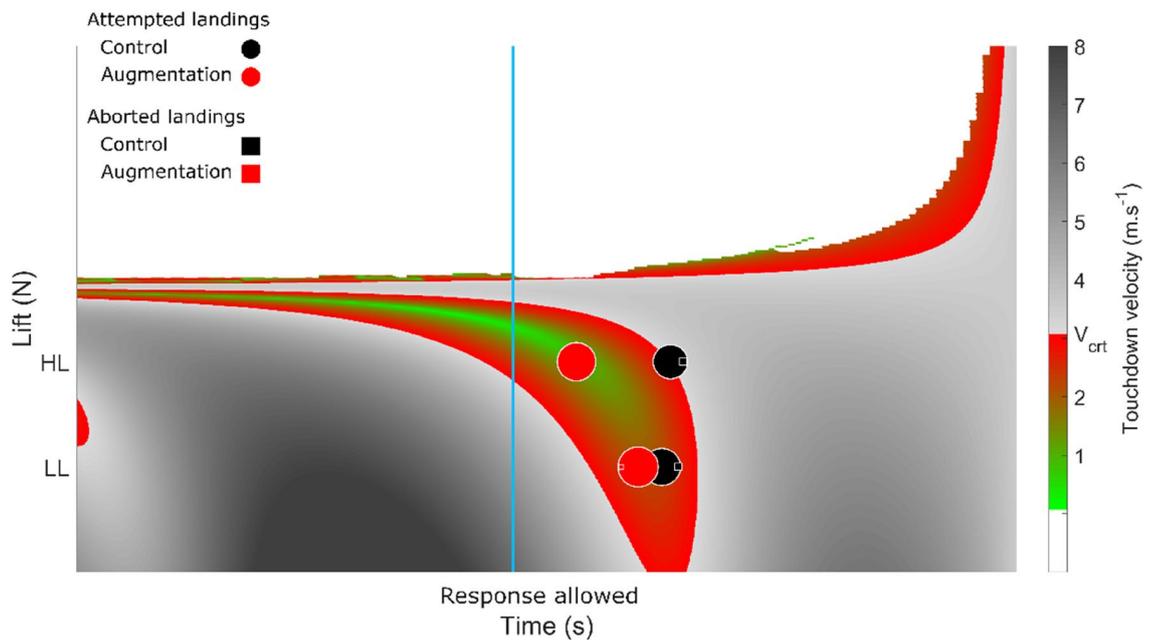


Figure 8. Inter-individual average frequency of attempted and aborted deck-landing (circles and squares symbols, respectively) under Control and Augmentation conditions (black and red, respectively) plotted in the condition [9 m; 0 rad] in which safe deck-landing was possible ($\pi_{optimal} = 0.70$ and 0.32 with groups LL and HL, respectively) over the deck-landing-ability landscape. The size of the symbols reflects the frequency of decisions. The green to red colors encode the distance from $V_{td}^{attempt}$ to V_{crit} , thus indicating the safety of the deck-landing attempt. Light to dark gray show unsafe deck-landing situations where $V_{td} > V_{crit}$.

Subjective ratings. Lastly, the perceived usefulness of the Augmentation was analyzed in order to complete this picture of the benefits of the Augmentation. The average ratings of MCH-UVD in the Augmentation condition were equal to 2.31 ± 2.54 (i.e., almost perfect perceived usability). A bilateral t-test for independent samples (2 groups [LL, HL]) performed on the individual ratings did not bring to light any significant differences between the groups HL and LL. In short, all the participants perceived the Augmentation as facilitating

5. Etude empirique de la perception de l'affordance d'apportabilité – 5.3. Articles

the decision-making process. These results are in line with the benefits of the Augmentation observed here on participants' performances.

Discussion

In this study, it was first proposed to model and investigate the perception of the affordance of deck-landing-ability, defined as the possibility of landing safely on the deck of a moving ship, based on the available lift potential. Moreover, we designed a visual Augmentation which intended to improve the decision to either attempt or to abort the deck-landing maneuver by presenting with the current and future deck-landing-ability during the ongoing approach. The deck-landing-ability presented on a laptop simulator was manipulated in order to investigate not only whether participants succeeded in deck-landing safely under non-augmented conditions but also whether the visual Augmentation actually improved their decision-making performances.

Naked eye perception of deck-landing-ability. The three main results obtained in this study suggest that participants perceived with the naked eye only roughly the affordance of deck-landing-ability as expressed in Eq. 1. Participants' decision to trigger or abort the deck-landing maneuvers and the timing at which they triggered the deck-landing were both consistent with our predictions and depended significantly on π . The distribution of aborted and attempted landings with reference to V_{crit} confirmed this hypothesis: the $V_{td}^{attempt}$ values were distributed around touchdown velocities below V_{crit} (i.e., those in the safe deck-landing window), whereas the V_{td}^{abort} values were distributed around touchdown velocities above V_{crit} (i.e., those in the unsafe deck-landing window). Participants therefore tended, to take into account at least to some extent the relationship between their future touchdown velocities and the value of V_{crit} when deciding whether or not to attempt deck-landing. Their perception of the affordance of deck-landing-ability was not very accurate, however. Participants triggered some of their landings outside the safe deck-landing window (cf. Figure 6, where it can be seen that the distribution of attempted landings shifted towards higher V_{crit} values) and their deck-landing attempts plateaued around 50% (instead of ideally, 0%) when safe deck-landing was impossible (cf. Figure 5, which shows the conditions where $\pi_{optimal} > 1$). The first explanation for this situation might be that participants may have overestimated V_{crit} . Another possibility might be that participants did not perceive the other component of the ratio determining the deck-landing-ability, namely $V_{achieved}$. This could happen if any of the variables in Eq. 1 could not be accurately detected. In particular, $V_{achieved}$ was partly determined by the future state of the ship at helicopter touchdown. The future state of the ship can be estimated based on the current state⁴¹. Under realistic conditions, expert pilots combined the vertical displacements of their helicopter with the heave motion of the ship prior to deck-landing. This coupling would enable them to explore the future swell state of the ship so as to keep the energy at impact below a certain threshold value⁴². We therefore hypothesized that this exploratory coupling would make the affordance of deck-landing-ability more salient and thus facilitate its perception. As the current study does not make it possible to actively control the helicopter's vertical movements, future experiments are now required in which participants are able to perform this exploratory coupling process, which would improve their perception of the situation (see Gibson's experiments on active touch⁴³). Lastly, a lack of information while hovering during the observation phase might provide a third explanatory hypothesis. Pritchard et al.³ have studied pilots gazing at the following three landmarks during the hovering and landing phases: one located on the flight deck at the intersection between the lineup line and the hangar, one just above that point in the top corner of the hangar roof, and one on the horizon. In the present study, only the last two landmarks were continuously available to the participants, since the first one was available only after the helicopter had started its descent towards the deck.

Augmentation of the affordance of deck-landing-ability. The present ecologically designed Augmentation improved the safety of participants with no piloting experience. Our analyses of $V_{td}^{attempt}$ showed that the Augmentation significantly reduced the number of unsafe attempted deck-landing maneuvers (i.e., those endangering the helicopter's structure and participants' physical state) in comparison with the non-augmented, Control conditions. This is a great step forward in the prevention of deck-landing fatalities. Likewise, our analyses of V_{td}^{abort} showed that the Augmentation significantly reduced the number of aborted maneuvers when safe deck-landing windows were available. This method could also save lives because it prevents the hover phase from lasting, thus preventing an increase in workload and frustrations⁴ and the resulting occurrence of deck-landing attempts outside safe landing windows. Our analysis of individual MCH-UVD ratings also showed that the participants perceived the Augmentation as a means of facilitating the decision-making process. We then attempted to elucidate how the Augmentation improved participants' decision-making. We first established that the benefits of the Augmentation originated both from the fact that it enabled participants to make a clear-cut distinction between safe and unsafe deck-landing windows. It decreased the number of deck-landing attempts corresponding to unsafe deck-landing conditions and maximized those corresponding to safe deck-landing conditions. Secondly, we observed that the Augmentation enabled participants to time their deck-landing attempts optimally. These benefits are apparently greater than those obtained using the visual Augmentation method developed by Morice et al.²³, who did not find any significant improvement in V_{td} . More generally speaking, the results obtained in the present study support the idea that understanding the agent/environment system in terms of what it affords is a fruitful approach to designing meaningful Augmentations. We readily acknowledge the fact that the aforementioned affordance of deck-landing-ability includes more than just the involved energy constraints and that the use of several levels of abstraction may not yet be fully integrated. However, the present model of the affordance of deck-landing-ability shows the advantages of affordance-based control models developed on similar lines to those presented by Fajen in the context of car braking^{28,29} and locomotion³³. The latter models included the behavioral regulation aspects, which seem to be particularly useful for designing an interface improving the performance of goal-based visually controlled tasks. We therefore believe that interface

5. Etude empirique de la perception de l'affordance d'appontabilité – 5.3. Articles

design should be grounded on a solid theoretical basis, while upholding the meaningfulness of perception as part of an agent/environment relationship⁴⁴. Only in this way will designers be able to develop interface displays that convey this meaning to the operator.

The form of the present Augmentation differs from projective displays such as those developed by Kruit⁴⁵ for assisting rally drivers by overlaying lines on the road using an HUD to regulate the cornering. In our own case, the use of an HUD is justified by the fact that it minimizes the amount of visual switching required between inside and outside the cockpit, thus decreasing pilots' workload. The form of our interface also differs from previous EID applications such as DURESS⁴⁶, in which the interface took the form of geometric shapes standing for relevant aspects of a nuclear power plant. In the present application, the deck-landing-ability is depicted in a more graphic way, as in the force ratio and force ratio trend displays developed for military control systems by Hall et al.⁴⁷. Despite these differences, the form of the present interface allows the emergence of several relevant properties. For example, the closing rate between the black area indicating the end of the trial and the white vertical line indicating the current time makes it possible to visualize the closing rate between the helicopter and the deck. Likewise, the distance between these components indicates the time-to-contact with the deck. The emergence of these properties is possible because the highly structured information brings to light the affordances at work, as in the DURESS or Kruit interfaces.

There exist a whole set of clues suggesting that the present visual Augmentation may also be beneficial to experienced helicopter pilots. The present study involved participants with no prior skills in aeronautics, as the samples tested by Padfield & Lee⁷ to determine the role of visual invariant in regulating a wide set of helicopter's maneuvers, and by Pinder et al.⁴⁸ to test a visual interface developed to improve the regulation and decision-making of aircraft pilots during take-off and landing. The results obtained here on participants with no piloting experience prove that the present design succeeds in conveying information about the deck-landing possibilities. Experts can be expected to be at least as good as novices at understanding and using EID⁴⁹. In addition, the exact nature of the information conveyed was established in a careful work domain analysis involving expert pilots. The present design will therefore probably convey information to experts as well. In short, both the informational content and the form of the Augmentation can be logically expected to ensure a good level of performance to more experienced pilots. The benefits of our Augmentation would perhaps be less obvious with experts because they would be more able to detect the affordances at work with the naked eye, to be more sensitive to high-order affordances³¹, to make better decisions and regulate their actions more successfully⁵⁰ than novices. If experts' performances per se would therefore not be greatly improved by our Augmentation (since they already perform well under non-augmented conditions), our interface would still no doubt have other more subtle benefits when used by expert pilots, such as reducing their workload⁵¹ and improving their error detection and situation awareness⁴⁹, which would reduce the fatigue occasioned by this highly demanding task. These benefits will in turn improve these pilots' ability to repeat safe landings despite having to cope with lengthy operations, stress, and even technical problems.

Towards real-life applications. The first step in filling the gap between the present Augmentation designed to assist the decision-making process and future developments dealing with more ecological situations would require to continuously control the helicopter's lift via the collective stick during the descent. The design of the visual Augmentation would therefore have to be reworked accordingly. This would first serve to test the relevance of the affordance model for deck-landing-ability to capture participants' ability to regulate their descent. Secondly, it would test the hypothesis that the coupling behavior previously observed⁴² may be exploratory behavior. We therefore expect that participants allowed to continuously control the collective stick would either naturally show this coupling behavior and/or produce better performances when forced to do so. These future results would be in line with the idea that perception of affordance is better under moving than stationary conditions⁵².

The second step in dealing with more ecological situations could secondly be achieved by improving the realism of the helicopter and ship movements so as to simulate the real-life dynamics more accurately. In the present study, the ship's dynamics were simulated with a sinusoid, and the helicopter dynamics, using elementary lift-gravity models (cf. Equation 1). The current Augmentation would certainly benefit from incorporating finer helicopter and ship models. For example, the fidelity of helicopter models could be improved by including either linear or nonlinear dynamic features⁵³. Methods for improving the ship dynamics on the other hand could be based on filter analogies or deterministic models based on ship and forthcoming encountered wave properties⁵⁴.

The third step, including other constraints than the touchdown velocity constraint V_{td} in the design of this Augmentation would greatly improve this approach for dealing with real-life situations. Balance and precision constraints, which are related to the roll, transversal and forward movements of the ship, are additional aspects worth taking into consideration when modeling the affordance and designing the Augmentation. Work domain analyses based on reviews of the literature^{1,2,4,55}, technical reports⁵⁶ and pilots' interviews have suggested in fact that the deck-landing-ability is a multidimensional affordance⁵⁷ which depends not only on the touchdown velocity constraints.

Conclusions

The visual Augmentation we designed taking an ecological approach enhanced the safety of participants with no piloting experience by sharpening their perception of the *deck-landing-ability affordance*. Enabling to continuously control the helicopter's lift in an immersive simulator in order to study the information pickup through exploratory movements will be the next step in our experimental program.

5. Etude empirique de la perception de l'affordance d'appontabilité – 5.3. Articles

Data availability

The datasets generated by the laptop simulation and analyzed in the present study are available in the “HelicopterShipLanding-EID-decision_data” repository, https://github.com/AntoineHPMORICE/HelicopterShipLanding-EID-decision_data.

Received: 31 May 2022; Accepted: 20 December 2022

Published online: 29 March 2023

References

- Berbaum, K. S., Kennedy, R. S. & Hettinger, L. J. Visual tasks in helicopter shipboard landing. *Appl. Ergon.* [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(91\)90226-8](https://doi.org/10.1016/0003-6870(91)90226-8) (1991).
- Hoencamp, A. van Holten, T., Prasad, J. V. R. Relevant aspects of helicopter-ship operations, p. 11, 2008.
- Pritchard, J. A., Wallace, R. D., Tritschler, J. K., O'Connor, J. C., Artech, D. R., Characterization of pilot strategy for simulated shipboard approaches with realistic ship motion, p. 17.
- D. Minotra, K. M. Feigh, Studying pilot cognition in ship-based helicopter landing maneuvers , p. 13.
- Wang, Y., White, M., Owen, L., Hodge, S. & Barakos, G. Effects of visual and motion cues in flight simulation of ship-borne helicopter operations. *CEAS Aeronaut. J.* <https://doi.org/10.1007/s13272-013-0085-9> (2013).
- Friesen, D., Pavel, M. D., Borst, C., Stroosma, O., Masarati, P., Mulder, M., Design and evaluation of a constraint-based head-up display for helicopter obstacle avoidance during forward flight », in *AIAA Scitech 2020 Forum*, Orlando, FL, 2020. doi: <https://doi.org/10.2514/6.2020-0667>.
- Padfield, G. D., Lee, D. N. & Bradley, R. How do helicopter pilots know when to stop, turn or pull up? (developing guidelines for vision aids). *J. Am. Helicopter Soc.* <https://doi.org/10.4050/JAHS.48.108> (2003).
- Stanton, N. A., Plant, K. L., Roberts, A. P., Harvey, C. & Thomas, T. G. Extending helicopter operations to meet future integrated transportation needs. *Appl. Ergon.* **53**, 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.07.001> (2016).
- Walko, C. & Maibach, M. J. Flying a helicopter with the HoloLens as head-mounted display. *Opt. Eng.* <https://doi.org/10.1117/1.OE.60.10.103103> (2021).
- Gibson, J. J. *The theory of affordances* 67–82 (Hilldale, 1977).
- Stoffregen, T. A., Affordances as properties of the animal–environment system, p. 21.
- Vicente, K. J. & Rasmussen, J. Ecological interface design: Theoretical foundations. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* <https://doi.org/10.1109/21.156574> (1992).
- Sawaragi, T., Shiose, T. & Akashi, G. Foundations for designing an ecological interface for mobile robot teleoperation. *Rob. Auton. Syst.* [https://doi.org/10.1016/S0921-8890\(99\)00108-6](https://doi.org/10.1016/S0921-8890(99)00108-6) (2000).
- Cummings, M. L., Guerlain, S., Bass, E. J., Informing design of a command and control decision support interface through an abstraction hierarchy , *th Annual meeting*, p. 5.
- Cummings, M. L., Guerlain, S., « The tactical Tomahawk conundrum: Designing decision support systems for revolutionary domains », In *SMC'03 conference proceedings. 2003 IEEE international conference on systems, man and cybernetics. conference theme—system security and assurance (Cat. No.03CH37483)*, Washington, DC, USA, 2003, vol. 2, p. 1583-1588. doi: <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2003.1244638>.
- Talcott, C. P., Bennett, K. B., Martinez, S. G., Shattuck, L. G. & Stansifer, C. Perception-action icons: An interface design strategy for intermediate domains. *Hum. Factors* <https://doi.org/10.1518/001872007779598064> (2007).
- Bennett, K. B., Posey, S. M. & Shattuck, L. G. Ecological interface design for military command and control. *J. Cogn. Eng. Decis. Mak.* <https://doi.org/10.1518/155534308X377829> (2008).
- Borst, C., Mulder, M. & Van Paassen, M. M. Design and simulator evaluation of an ecological synthetic vision display. *J. Guid. Control Dyn.* <https://doi.org/10.2514/1.47832> (2010).
- Borst, C., Sjer, F. A., Mulder, M., Van Paassen, M. M. & Mulder, J. A. Ecological approach to support pilot terrain awareness after total engine failure. *J. Aircr.* <https://doi.org/10.2514/1.30214> (2008).
- Amelink, M. H. J., Visual control augmentation by presenting energy management information in the primary flight display , p. 161, 2002.
- Amelink, M. H. J., Flach, J. M., Total energy-based perspective flight path display for aircraft guidance along complex approach trajectories, p. 6, 2003.
- Ellerbroek, J., Brantegem, K. C. R., van Paassen, M. M. & Mulder, M. Design of a coplanar airborne separation display. *IEEE Trans. Human-Mach. Syst.* <https://doi.org/10.1109/TSMC.2013.2242888> (2013).
- Morice, A. H., Rakotomamonjy, T., Serres, J. R. & Ruffier, F. Ecological design of augmentation improves helicopter ship landing maneuvers: An approach in augmented virtuality. *PLoS One* **16**(8), 0255779 (2021).
- Friesen, D. *et al.* Design and evaluation of a constraint-based head-up display for helicopter obstacle avoidance. *J. Aerosp. Inf. Syst.* <https://doi.org/10.2514/1.1010878> (2021).
- McIlroy, R. C. & Stanton, N. A. Ecological interface design two decades on whatever happened to the SRK Taxonomy. *IEEE Trans. Human Mach. Syst.* **47**(89), 78. <https://doi.org/10.1109/THMS.2014.2369372> (2015).
- Department of Defense United States of America, « NATOPS Flight manual SH--60B », NATOPS Flight manual A1-H60BB-NFM-000.
- Desjardins, S., Zimmerman, R. E., Bolukbasi, A. O. & Merritt, N. A. Aircraft crash survival design guide. volume 4. aircraft seats, restraints, litters, and cockpit/cabin de-lethalization, SIMULA INC PHOENIX AZ, Tech Rep, 1989.
- Fajen, B. R. Calibration, information, and control strategies for braking to avoid a collision. *J. Exp. Psychol.: Hum. Percept. Perform.* <https://doi.org/10.1037/0096-1523.31.3.480> (2005).
- Fajen, B. R. Perceptual learning and the visual control of braking. *Percept. Psychophys.* <https://doi.org/10.3758/PP.70.6.1117> (2008).
- Morice, A. H. P., Diaz, G. J., Fajen, B. R., Basilio, N. & Montagne, G. An affordance-based approach to visually guided overtaking. *Ecol. Psychol.* **27**(1), 1–25. <https://doi.org/10.1080/10407413.2015.991641> (2015).
- Basilio, N., Morice, A. H., Marti, G. & Montagne, G. High- and low-order overtaking-ability affordances: Drivers rely on the maximum velocity and acceleration of their cars to perform overtaking maneuvers. *Hum. Factors* **57**(5), 879–894 (2015).
- Marti, G., Morice, A. H. & Montagne, G. Drivers' decision-making when attempting to cross an intersection results from choice between affordances. *Front. Hum. Neurosci.* **8**, 1026 (2015).
- Steinmetz, S. T., Layton, O. W., Powell, N. V. & Fajen, B. R. Affordance-based versus current-future accounts of choosing whether to pursue or abandon the chase of a moving target. *J. Vis.* <https://doi.org/10.1167/jov.20.3.8> (2020).
- Warren, W. H. Perceiving affordances: Visual guidance of stair climbing. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* **10**, 21 (1984).
- Warren, W. H. & Whang, S. Visual guidance of walking through apertures: Body-scaled information for affordances. *J. Exp. Psychol.: Hum. Percept. Perform.* **13**(3), 371–383. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.13.3.371> (1987).
- Cohen, L., Manion, L. & Morrison, K. *Research methods in education* 6th edn. (Routledge, London, 2007).

5. Etude empirique de la perception de l'affordance d'appontabilité – 5.3. Articles

37. H. Bowles, D. Zimmermann, G. Noris, et B. Wang, « Crest: Novel Ocean Rendering Techniques in an Open Source Framework », in *Siggraph 2017 Advances in Real-Time Rendering in Games*, Los Angeles, United States, juill. 2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.inria.fr/hal-01572290>.
38. Carico, D., Ferrier, B., Evaluating landing aids to support helicopter/ship testing and operations », in *2006 IEEE aerospace conference*, Big Sky, MT, USA, 2006, pp. 1–13.
39. Donmez, B., Cummings, M. L., Graham, H. D., Brzezinski, A. S., Modified cooper harper scales for assessing unmanned vehicle displays », in *Proceedings of the 10th performance metrics for intelligent systems workshop*, 2010, pp. 235–242.
40. Franchak, J. & Adolph, K. Affordances as probabilistic functions: Implications for development, perception, and decisions for action. *Ecol. Psychol.* **26**(1–2), 109–124. <https://doi.org/10.1080/10407413.2014.874923> (2014).
41. Grocholsky, B., DeFranco, P., Cover, H., Singh, A., Singh, S., Robust autonomous ship deck landing for rotorcraft, p. 7.
42. Thomas, M. *et al.* Helicopter pilots synchronize their altitude with ship heave to minimize energy when landing on a ship's deck. *Int. J. Aerosp. Psychol.* **31**(2), 135–148 (2021).
43. Gibson, J. J. Observations on active touch. *Psychol. Rev.* **69**(6), 1962. <https://doi.org/10.1037/h0046962> (1962).
44. Bennett, K. B., Flach, J. M. 2011 *Display and interface design: Subtle science, exact Art*, 0 éd. CRC Press, Florida.
45. Kruit, J. D., Amelink, M., M Mulder, MM van Paassen, Design of a Rally Driver Support System using Ecological Interface Design Principles, in *2005 IEEE international conference on systems, man and cybernetics*, Waikoloa, HI, USA, 2005, vol. 2, pp. 1235–1239. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2005.1571315>.
46. Vicente, K. J. Improving dynamic decision making in complex systems through ecological interface design: A research overview. *Syst. Dyn. Rev.* **12**(4), 251–279. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1727\(199624\)12:4%3c251::AID-SDR108%3e3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199624)12:4%3c251::AID-SDR108%3e3.0.CO;2-S) (1996).
47. Hall, D. S., Shattuck, L. G. & Bennett, K. B. Evaluation of an ecological interface design for military command and control. *J. Cogn. Eng. Decis. Mak.* <https://doi.org/10.1177/1555343412440696> (2012).
48. S. D. Pinder, D. N. Bristow, et T. C. Davies, Interface design for an aircraft thrust and braking indicator/advisor », in *Proceedings of the 20th conference of the computer-human interaction special interest group (CHISIG) of Australia on Computer-human interaction: design: Activities, artefacts and environments-OZCHI '06*, Sydney, Australia, 2006, p. 103 doi: <https://doi.org/10.1145/1228196>.
49. Borst, C., Flach, J. M. & Ellerbroek, J. Beyond ecological interface design: Lessons from concerns and misconceptions. *IEEE Trans. Human-Mach. Syst.* <https://doi.org/10.1109/THMS.2014.2364984> (2015).
50. Brault, S., Bideau, B., Kulpa, R. & Craig, C. M. Detecting deception in movement: The case of the side-step in rugby. *PLoS One* **7**(6), 37494 (2012).
51. Schewee, F. & Vollrath, M. Ecological interface design effectively reduces cognitive workload—the example of HMIs for speed control. *Transp. Res. Part F: Traffic Psychol. Behav.* **72**, 155–170. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2020.05.009> (2020).
52. Oudejans, R. R. D., Michaels, C. F., Bakker, F. C. & Dolne, M. A. The relevance of action in perceiving affordances: Perception of catchableness of fly balls. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* **22**, 13 (1996).
53. Padfield, G. D. *Helicopter flight dynamics: The theory and application of flying qualities and simulation modelling* (Wiley, 2008).
54. GironSierra, J. M. & Esteban, S. The problem of quiescent period prediction for ships: A review. *IFAC Proc. Vol.* **43**(20), 307–312 (2010).
55. Tušl, M. *et al.* Helicopter pilots' tasks subjective workload, and the role of external visual cues during shipboard landing. *J. Cogn. Eng. Decis. Mak.* <https://doi.org/10.1177/1555343420948720> (2020).
56. B. Herry, L'appontage dans la marine française: Une approche opérationnelle, ONERA, Département aérodynamique appliquée, Rapport Technique RT 1/16616 DAAP, juill. (2010).
57. H. Hefi, Affordances, dynamic experience, and the challenge of reification. In *How Shall Affordances be Refined? Four Perspectives*. 149–180. (Routledge, 2018).

Acknowledgements

The participation of Mathieu Thomas in this research project was supported by a grant (DGA 2018 60 0013) from the Direction Générale de l'Armement (DGA) and the Office National d'Etudes et de Recherches Aéropatiales (ONERA). The authors wish to thank Jessica Blanc for revising the English of the manuscript.

Author contributions

M.T. developed the theoretical formalism with inputs from all authors, performed the analytic calculations and performed the numerical simulations. A.M. developed the rotorcraft simulator. F.R., J.R.S., T.R. and A.M. supervised the project and allocated resources for carrying the experimentation. All authors wrote and reviewed the final version of the manuscript.

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Additional information

Correspondence and requests for materials should be addressed to M.T.

Reprints and permissions information is available at www.nature.com/reprints.

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© The Author(s) 2023

5.4. Discussion

Les résultats de l'expérimentation sont encourageants à bien des égards, tant en ce qui concerne la faculté du modèle à capturer la prise de décision des participants que dans les capacités de l'assistance à la suppléer. Cependant nous sommes conscients des limites méthodologiques qu'une expérimentation sur ordinateur impliquant des participants novices possède pour la généralisation des résultats.

5.4.1. Réalisme et implémentations de la simulation

Le réalisme de la simulation est un paramètre à prendre en compte. Notamment, la tâche de presse bouton rendu sur écran d'ordinateur telle que nous l'avons implémentée dans cette seconde étude peut être améliorée. En effet l'écart peut sembler important avec des simulations réalistes (par exemple, une capsule monoplace montée sur un système de mouvement à six axes et haute bande passante utilisé dans le simulateur de vol de Liverpool; le simulateur de mouvement vertical synergique à huit degrés de liberté de la NASA Ames; QinetiQ; Advanced Flight Simulator), ou encore les situations réelles. Les simulateurs à bases mobiles permettant la simulation des mouvements de l'appareil sont bénéfiques en comparaison aux simulateurs d'hélicoptère à bases fixes (MILLER, KOCHER, GRUGAN et al. 2009; RICARD et PARRISH 1984; MEMON, OWEN et Mark D. WHITE 2019), mais peuvent également entraîner des effets indésirables, tels que le mal des transports par exemple (ALLGOOD, RS KENNEDY et KS BERBAUM 1988). De plus, la contribution des indices relatifs aux mouvements fournis par les simulateurs à bases mobiles varie selon que les mesures soient subjectives ou objectives (PARRISH, HOUCK et MARTIN JR 1977). Dans le cas plus spécifique d'opérations maritimes, WANG, M. WHITE, OWEN et al. 2013 ont observé que les indices de mouvement avaient un effet sur la charge de travail des pilotes lors des appontages dans le simulateur HELIFLIGHT-R de l'Université de Liverpool, mais ce uniquement dans des environnements visuels dégradés ce qui n'est pas le cas dans la présente étude. Cependant, nous tenons à souligner un bénéfice notable de la méthode choisie dans notre étude. Cette méthode nous a permis de continuer à mener nos expérimentations lors de la crise du covid-19 et de pouvoir faire face aux nombreuses incertitudes qui en ont découlé. Ainsi nous pensons qu'il est essentiel de conserver cette souplesse dans nos méthodes scientifiques afin de rester adaptables aux situations inattendues, tout en gardant à l'esprit les sacrifices qu'elles impliquent.

5.4.2. Réalisme et enjeux

Enfin, des limitations plus générales, communes aux méthodes visant à simuler la réalité doivent être considérées. Parmi celles-ci la motivation liée à l'enjeu ou au rapport risques récompenses sont des facteurs influençant le comportement qu'il est difficile de simuler. Actuellement l'étude ne contrôle pas ce ratio risques/récompenses. Or, comme le soulignent FRANCHAK et ADOLPH 2014, il faut prendre en compte cette balance risques bénéfiques pour capturer le processus réel de prise de décision. FRANCHAK

5. Etude empirique de la perception de l'affordance d'appontabilité – 5.4. Discussion

et ADOLPH 2014 proposent de prendre en compte ce rapport risques bénéfiques en considérant les affordances probabilistiquement, c'est à dire non pas simplement comme des entités binaires (possibles ou impossibles) mais comme des possibilités de réussites plus ou moins probables. Suivant cette conception des affordances, un agent peut percevoir que ses possibilités de traverser un pont sans tomber sont de $\pi = 50\%$, mais sa décision de s'engager sur le pont et actualiser l'affordance de traverser ne sera pas la même qu'il s'agisse d'un pont au dessus d'une piscine d'eau ou de magma en fusion. Cette hypothèse est cohérente avec l'observation que des participants jugent qu'ils accorderaient une marge de sécurité plus importante pour se baisser sous une barrière en mousse par rapport à une barrière en métal par exemple (Jeffrey B WAGMAN et MALEK 2009).

Ainsi considérer l'enjeu lié à la tâche d'appontage peut éclairer les résultats de notre étude. L'on peut penser par exemple que sous certains aspects, le comportement observé dans notre étude ne se transpose pas exactement à la réalité. En effet, nous avons pu observer des fréquences assez élevées de décision d'apponter dans des conditions ne permettant pas un appontage sûr. Cela peut s'expliquer par le faible coût de l'erreur. A vrai dire, prendre la décision d'apponter hors des limites de sécurité n'avait aucun impact pour le participant lors de la seconde expérience. Ainsi, il est probable qu'en situation réelle — où le risque lié à l'échec est plus élevé (l'erreur pouvant être fatale) — le comportement des pilotes soit plus conservateur, et la fréquence de wave-off soit plus élevée. Une méthode similaire à celle employée par Steinmetz (STEINMETZ, LAYTON, POWELL et al. 2020) dans l'étude de l'interception d'une cible mobile, permettrait certainement de contourner ce problème. Dans cette étude les participants obtenaient un score en fonction de la justesse de leurs décisions et de leurs performances. Par exemple, décider de poursuivre une cible qui n'était pas « interceptable » était d'autant plus détrimentaire pour le score des participants que ceux-ci la poursuivaient longtemps. Le même système de score, sur lequel serait éventuellement indexée une récompense financière par exemple, permettrait de contrôler le ratio risque/récompense et ainsi augmenter le réalisme de la simulation. En effet, puisque les conséquences pour les participants en environnement virtuel diffèrent de celles pour les pilotes en situation réelle, les affordances simulées et réelles diffèrent également, précisément car elles sont fonctionnelles et qu'une affordance permettant d'accroître son score n'est pas identique à celle permettant de survivre (Thomas A STOFFREGEN, Benoit G BARDY, SMART et al. 2003).

5.4.3. Novices vs experts

Enfin, le public sur lequel portait cette seconde expérience, un public novice en ce qui concerne le pilotage d'hélicoptère et l'appontage, diffère d'un public de pilotes experts. Nous pouvons donc légitimement nous demander si les résultats obtenus se généralisent à une population d'experts.

Remarquons tout d'abord que des novices peuvent atteindre un niveau d'habilité

5. Etude empirique de la perception de l'affordance d'appontabilité – 5.4. Discussion

suffisant pour réaliser des comportements performants après seulement 15 minutes de familiarisation (CHRISTOPHER C PAGANO et DAY 2019) et même recalibrer leurs capacités d'action après quelques essais (Brett R FAJEN 2007). Nos résultats, qui montrent que les novices perçoivent au moins approximativement l'affordance d'appontabilité, sont cohérents avec cette hypothèse. Par conséquent, les effets de l'expertise concernant le choix ou la détection de l'affordance appropriée devraient être minimisés dans la présente étude. Cette hypothèse est d'autant plus envisageable que la dynamique de l'hélicoptère est simplifiée et ne requiert donc pas la finesse de pilotage que des experts doivent acquérir en situation réelle. Ainsi il est possible d'étudier le couplage perception-action lors du contrôle d'un hélicoptère, et de tester une interface visuelle visant à améliorer la régulation et la prise de décision des pilotes d'aéronefs lors des décollages et des atterrissages avec des novices (Gareth D. PADFIELD, David N. LEE et R. BRADLEY 2003).

Pour finir, nous ne pouvons exclure l'hypothèse que l'assistance soit bénéfique pour des experts qui, bien que compétents en ce qui concerne la perception et l'exploitation des affordances, pourraient se retrouver en difficulté lors de l'appontage. En effet, la multitude de facteurs externes liés à la complexité des opérations militaires peuvent entraver la performance, même d'experts, qui bénéficieraient donc d'une assistance leur facilitant l'accès à une affordance dont ils ont besoin (cf chapitre 2) mais qu'ils peuvent ne pas toujours percevoir convenablement. Nous avons donc conçu l'augmentation comme une aide visuelle pouvant être utilisée par des opérateurs qui pourraient ne pas être capables de percevoir et utiliser l'affordance dans des situations de prise de décision, mais gardons à l'esprit que ces tests doivent selon nous être étendus à la population cible.

6. Discussion

6.1. Le contrôle de l'action selon la perception directe

Quand on en vient aux questions de la régulation de l'action, c'est-à-dire comment un agent régule son comportement, ses actions, on se retrouve souvent à un croisement dans la littérature écologique. Lois de contrôle vs modèles de régulation basés sur les affordances pourrait être le nom de ce croisement. Le comportement est-il régulé de simples régulations de variables perceptives, tel que maintenir un tau dot à -0.5 lors du freinage, ou bien est-il régulé sur la base des possibilités d'action, de façon à maintenir des possibilités existantes, par exemple en s'assurant que la décélération requise pour freiner n'excède pas la décélération maximale disponible? D'un point de vue théorique, en ce qui concerne la régulation du vol, les deux pistes sont envisagées.

6.1.1. Régulation du vol basé sur des lois de contrôle

Fondamentalement des lois de contrôle sont proposées pour expliquer la régulation du vol. Padfield notamment reprend l'idée d'une régulation du pilotage basé sur tau dot (G. D. PADFIELD 2011; G. D. PADFIELD et M. D. WHITE 2003) lorsque Lee, quant à lui, se propose d'expliquer « l'affleurissage » (*flower docking*) de colibri en se basant sur une loi similaire de régulation du tau dot (D. N. LEE, REDDISH et RAND 1991). Ces lois de contrôle basées majoritairement sur la régulation de variables optiques trouvent leur application dans la conception d'agent autonome et la conception d'assistance. En effet, nombre des avancées dans la régulation du vol d'agents autonomes se rapprochant des théories écologiques, notamment en biorobotique, impliquent des lois de contrôles (RUFFIER et FRANCESCHINI 2005; RUFFIER et FRANCESCHINI 2015; Julien R. SERRES et RUFFIER 2017; ROUBIEU, Julien R SERRES, COLONNIER et al. 2014). Dans le cas de l'appontage, Voskuijl propose et teste un pilote automatique régulant son posé sur une frégate en se basant sur une loi de contrôle de type tau dot (VOSKUIJL, G. D. PADFIELD, WALKER et al. 2010). Les travaux de Morice et al. (MORICE, RAKOTOMAMONJY, Julien R SERRES et al. 2021) quant à eux montrent un effet bénéfique d'une assistance visuelle à l'appontage dans la lignée des approches basées tau dot. Les lois de contrôle constituent donc un concept théorique riche qui trouve écho dans l'étude du comportement et dans la conception. Selon la perspective des lois de contrôle, l'action est donc régulée sur la base des lois de contrôle. Cependant lois de contrôle et affordances ne sont pas complètement inconciliables. Selon Warren en effet (William H. WARREN 1988), l'agent sélectionne l'affordance qu'il souhaite

réaliser et la réalise en appliquant la loi de contrôle adéquate. L'affordance informe l'agent sur l'action qu'il peut réaliser, la loi de contrôle lui permet de la réaliser. Mais une approche plus unifiée existe : une approche selon laquelle l'affordance n'est pas simplement source d'information sur des possibilités d'action, mais également la base de la régulation de l'action. C'est cette piste que nous avons suivie dans cette thèse, de sorte à tirer profit de la formalisation de l'affordance pour, dans le futur, assister les pilotes dans leur régulation de l'action, le pilotage.

6.1.2. Régulation du vol basé sur les affordances

Dans cette thèse, nous avons pris le parti des modèles basés affordances (cf. développement au chapitre 4), suivant ainsi les préceptes de l'EID (K. VICENTE et J. RASMUSSEN 1992; Kim J. VICENTE 1996). En effet, de nombreux designs d'interface dans le domaine aéronautique se basent sur des modèles d'affordances (Matthijs H J AMELINK et John M FLACH 2003; C. BORST, SJER, M. MULDER et al. 2008; MARWIJK, Clark BORST, Mark MULDER et al. 2011). Le modèle d'affordance développé au chapitre 4 de cette thèse offre une formalisation de la prise de décision d'apponter et de la régulation de la manœuvre d'appontage. Conformément à ce modèle, les pilotes devraient déclencher le posé seulement lorsque l'énergie à l'impact est inférieure à une valeur critique au-delà de laquelle leur intégrité et celle de l'appareil ne sont plus assurées. La régulation de la manœuvre de vol stationnaire et de posé implique quant à elle de maintenir une portance idéale parmi la gamme de portances disponibles (cf chapitre 4 pour plus de développement). Nous avons testé expérimentalement la faculté du modèle à capturer la prise de décision d'apponter. La faculté du modèle à capturer la régulation de la manœuvre reste à tester expérimentalement. D'autres affordances ont été formalisées dans le domaine aéronautique qui pourraient permettre d'expliquer la régulation et la prise de décision dans des cas connexes à l'appontage. Par exemple, Flach et Warren détaillent la construction théorique de l'affordance employée en vol à basse altitude (John M FLACH et Rik WARREN 2018) de façon très rigoureuse. Développer un modèle de régulation du vol à basse altitude à partir de ce modèle d'affordance pourra peut-être expliquer la régulation de la phase d'approche de l'appontage par exemple.

6.1.3. Le rôle des affordances dans la coopération humain-machine / le cockpit du futur

Le choix entre lois de contrôle et modèle basé affordance a un impact à la fois sur la conception d'agent autonome et la conception d'assistances. Dans le milieu aéronautique, ce constat est d'autant plus vrai que la conception d'agent autonome et la conception d'assistance au pilotage partagent un avenir commun, un lien supplémentaire, peut-être le plus intéressant selon moi. Cette avenir commun est celui d'un « joint cognitive system » (Matthijs Hendrik Jan AMELINK 2010; WOODS et HOLLNAGEL 2006) dans lequel les rôles au sein du cockpit sont partagés entre membres de l'équipage et agents autonomes. L'inclusion de l'intelligence artificielle au sein des cockpits

6. Discussion – 6.1. Le contrôle de l'action selon la perception directe

est en effet un axe majeur pour de nombreux acteurs du domaine aéronautique et de la défense (Thalès¹; Dassault²; Lockheed Martin³; Boeing⁴; Airbus⁵; voir également le programme *Man-Machine-Teaming* de Dassault et Thalès⁶). Dans un tel système intégrant agents humains et artificiels, l'humain est reconnu pour sa capacité de résolution de problèmes complexes, sa créativité et la machine, l'agent autonome, pour sa fiabilité (Max MULDER 2016).

L'enjeu d'une coopération humain – machine devient celui de concevoir des interfaces et des agents autonomes de manière à ce que l'automate et l'agent partagent une représentation commune de l'espace du problème (Max MULDER 2016). Une représentation commune est essentielle pour assurer une communication claire entre l'agent autonome et l'humain, soutenir leur coopération et améliorer la résilience du système face aux incidents et accidents ZIEBA, POLET, VANDERHAEGEN et al. 2010. Dans la conception d'interfaces écologiques, l'affordance capture cet espace du problème et est représentée sur l'interface de manière à soutenir l'agent dans sa recherche de solution (BENNETT et John M. FLACH 2011). Le rôle des affordances dans la conception d'interface est donc centrale (BENNETT et John M. FLACH 2011; K. VICENTE et J. RASMUSSEN 1992). Du côté de la conception d'agents autonomes, la place du concept d'affordance s'accroît (HORTON, CHAKRABORTY et AMANT 2012; RENAUDO, ZECH, CHATILA et al. 2022), et doit continuer à s'accroître de sorte qu'une représentation commune à l'humain et la machine soit effectivement possible.

Ainsi, le développement de systèmes coopératifs humains-machines qui semble être l'enjeu majeur des prochaines années, bénéficiera de l'accroissement du développement d'agents artificiels basés sur des modèles affordances. Dans cette perspective, il est d'autant plus pertinent de continuer à formaliser les affordances impliquées dans la régulation du vol en générale et de l'appontage en particulier. Dans cette optique, le modèle d'affordance présenté dans cette thèse pourrait-être raffiné, en incluant des modèles d'hélicoptère et de navire plus réalistes afin d'assister des pilotes en situations réelles, en s'inscrivant dans cette philosophie de conception.

6.1.4. Couplage hélicoptère-frégate

Nous avons observé que des pilotes experts pratiquant l'appontage tendaient à coupler les déplacements verticaux de leur appareil avec ceux du pont d'envol de la frégate (chapitre 3). De plus, nous avons émis l'hypothèse qu'un tel comportement

1. <https://www.thalesgroup.com/fr/les-4-technologies-cle-de-thales>

2. <https://www.dassault-aviation.com/fr/groupe/nous-connaitre/innovation/intelligence-artificielle/dassault-aviation-et-lintelligence-artificielle/>

3. <https://www.lockheedmartin.com/en-us/capabilities/autonomous-unmanned-systems.html>

4. <https://air-cosmos.com/article/protocole-d-accord-entre-boeing-et-shield-ai-pour-des-avions>

5. <https://www.airbus.com/en/innovation/industry-4-0/artificial-intelligence>

6. <https://www.dassault-aviation.com/en/group/press/press-kits/launch-man-machine-teaming-advanced-study-programme/>

6. Discussion – 6.2. La spécification de l’affordance d’appontabilité

de couplage aurait un but fonctionnel, ou du moins constituerait une stratégie efficace permettant d’améliorer la sécurité lors de l’appontage, en diminuant l’énergie à l’impact, notamment. Naturellement, la question se pose : pour quelles raisons cette stratégie de couplage est-elle bénéfique ? Pourquoi fonctionne-t-elle ? A cette question, deux explications nous semblent prometteuses :

1) La première suppose qu’il s’agit de mouvements exploratoires permettant le prélèvement d’information dans le flux perceptif. Nous revenons sur ce point dans la partie 6.2 dédiée à la spécification de l’affordance d’appontabilité.

2) La seconde est celle d’une stratégie ayant pour but de se mettre dans les meilleures conditions pour déclencher le poser. Il s’agirait ici par exemple d’aligner des fenêtres de roll-over et d’énergie à l’impact grâce à ce couplage avec le navire. Une telle hypothèse peut se vérifier par la simulation numérique. Elle requiert de formuler l’affordance d’appontabilité dans sa dimension d’équilibre (roll-over) de la même manière que nous l’avons formulée dans sa dimension d’énergie à l’impact. Pour ce faire, les équations développées dans les études sur le roll-over sont à consulter (BERRY 1998; DANG-VU 2018). Nous pouvons cependant déjà apporter quelques éléments de réflexion sur la simple base de notre étude numérique du modèle d’affordance présenté à l’équation 4.5. En effet, il apparaît que le couplage des déplacements verticaux de l’hélicoptère avec ceux du navire a pour conséquence d’élargir la fenêtre d’appontage au détriment de sa profondeur. Il semble donc, d’un point de vue purement mathématique, que la stratégie de couplage observée dans l’expérimentation 1 (chapitre 2) soit une façon d’échanger de la profondeur de fenêtre au profit de sa largeur, offrant plus de liberté au pilote quant à l’instant auquel déclencher le posé. Cette plus grande liberté dans le choix de l’instant de déclenchement pourrait permettre d’attendre le moment où le risque de roll-over est minime, par exemple.

6.2. La spécification de l’affordance d’appontabilité

6.2.1. Spécifier la dynamique du pont (rythmicité)

L’équation 4.5 suggère que les conditions de poser sont déterminées en partie par les capacités de l’hélicoptère, mais également par l’état du système hélicoptère-navire au moment de l’impact. Or, en situation réelle, les mouvements du navire ne permettent pas en permanence l’appontage. Les pilotes doivent donc, à un instant donné, anticiper l’état futur du navire afin d’identifier le moment opportun pour déclencher le poser. Comment les pilotes accèdent-ils à cette information sur l’état futur du navire ? Ceci revient à questionner l’existence d’une caractérisation de l’état futur du navire, pour être d’une certaine façon « anticipable » à partir de l’état actuel.

Des mathématiciens et physiciens ont montré qu’il était possible de prédire les mouvements du pont d’envol avec une assez grande précision sur plusieurs dizaines

6. Discussion – 6.2. La spécification de l’affordance d’appontabilité

de secondes (KHAN, BIL et MARION 2005; NAAIJEN, OOSTEN, ROOZEN et al. 2018; YANG, POTA, GARRATT et al. 2008; T. ZHANG, ZHENG et LIU 2021; ZHAO, XU et KWAN 2004). Cette prédiction suggère l’existence d’une forme de régularité, d’invariance dans certains comportements du navire qui sont en partie déterminées par les caractéristiques de ce dernier. Les caractéristiques du navire déterminent en effet son comportement en réaction à l’énergie transmise par les vagues. Ce sont en grande partie les vagues (leur force et leur orientation relatives) qui vont générer les oscillations de la frégate (donc du pont d’envol). Les vagues exercent leur force sur la frégate dont la réaction est contrainte par son état courant (vitesse, position, accélération etc..) et ses propriétés géométriques (FALNES et KURNIAWAN 2020). De plus, ces vagues, leurs amplitudes, leur fréquence, les quantités d’énergie qu’elles transmettent au navire ne sont pas chaotiques, mais présentent une certaine régularité que capturent, notamment, les spectres de niveaux de mer comme présenté à la figure 6.1. Cette régularité dans le profil des vagues et le fait que le comportement du navire en réponse à ses vagues est contraint, permet d’imaginer une certaine stabilité dans ce comportement du navire qui rendrait la prédiction de ses états futurs possibles, pour peu que le système formé par le navire et l’océan atteigne un état stable.

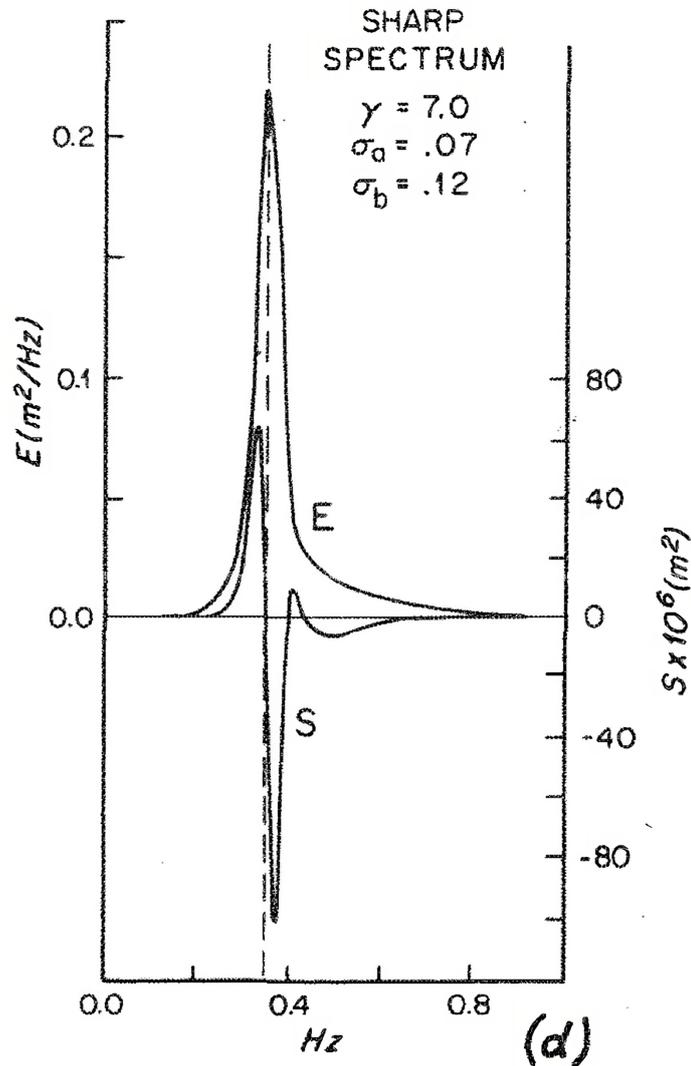


FIGURE 6.1. – Transfert d’énergie calculé pour un spectre de vague d’après les mesures du projet JONSWAP (K. HASSELMANN, BARNETT, BOUWS et al. 1973)

Si les états futurs du navire sont en effet mathématiquement prévisibles sur plusieurs secondes, le rationnel permettant d’expliquer l’anticipation par les pilotes reste à démontrer. Le développement d’une théorie de la perception du temps et du traitement des évènements (dynamic attending) avec une approche très écologique par Jones (M. R. JONES et BOLTZ 1989; M. R. JONES 2018) fournit des éléments de réponses. En effet, Jones définit en premier lieu l’objet de la perception, à savoir les évènements temporels, comme éléments incontournables d’une théorie de la perception du temps. Ainsi, un évènement temporel est n’importe quel objet ou activité de l’environnement qui varie au cours du temps. Selon cette théorie, des évènements cohérents, comme

6. Discussion – 6.2. La spécification de l’affordance d’appointabilité

la musique, par exemple, permettraient à l’observateur d’en anticiper le déroulement (LARGE et M. R. JONES 1999). Cela tient au fait que ces événements cohérents exhibent une prévisibilité temporelle très forte. Pour reprendre l’exemple de Jones, les notes composant une mélodie sont organisées de façon tellement cohérente au cours du temps qu’il est possible pour un écoutant d’anticiper quand et comment cette mélodie se termine. Conformément à cette hypothèse, cette capacité à se tourner vers l’avenir (future oriented attending) exploite la structure temporelle globale des événements. Pour Jones, les caractéristiques de ce qu’il y a à percevoir (les événements, la mélodie etc) sont déterminantes de la faculté à anticiper le déroulement des événements (M. R. JONES 2018). Puisque le signal est cohérent, nous pouvons l’anticiper. Jones décrit finement ce qu’est un événement cohérent, en rappelant bien qu’il s’agit d’un continuum sur lequel se distribuent des événements allant de totalement incohérents à complètement cohérents.

Où se trouvent les mouvements du navire sur ce continuum? Peut-on dire qu’un navire soumis à la houle exhibe un mouvement cohérent, donc qu’il est possible de l’anticiper?

Pour répondre à cette question, commençons par formaliser ce qu’est un événement temporel cohérent. La cohérence d’un événement temporel est dépendant de la distribution des informations non temporelles appelées marqueurs (e.g, les notes de musique, un accent tonique dans une conversation). Lorsque cette distribution de marqueurs exhibe une certaine régularité, lorsqu’une relation invariante existe entre ces marqueurs, alors ils composent une structure temporelle dite hiérarchique et l’évènement est temporellement cohérent. Les marqueurs sont donc des marqueurs en tant qu’ils marquent le début et/ou la fin de périodes dont l’imbrication constitue un événement temporel. Ces marqueurs peuvent être plus ou moins proéminent et marquer des périodes plus ou moins longues (i.e. à des échelles de temps plus ou moins grandes). C’est bien la relation entre des marqueurs à différentes échelles de temps qui détermine la cohérence d’un événement. Par exemple, si à l’échelle de temps n les marqueurs déterminent une période de 2s et les marqueurs à l’échelle de temps supérieur $n+1$ marquent une période de 4s, alors la structure est cohérente car les périodes à des échelles de temps différents constituant l’évènement sont liées par un ratio de 2. Dans cet exemple, la période au niveau le plus haut est une transformation de celle au niveau le plus bas suivant un ratio de 2 de la même manière que les éléments d’une suite géométrique sont liés par un facteur constant (la raison). A noter que des transformations additives existent. Dans ce cas, les périodes sont liées par un simple ajout de temps, comme on lie les éléments d’une suite arithmétique par ajout d’une valeur constante (la raison). A l’inverse dans les cas où une structure temporelle n’exhibe pas une telle régularité de transformation entre ses différents niveaux temporels, alors l’évènement n’est pas cohérent. La Figure 6.2 illustre cette notion de structures plus ou moins cohérentes.

6. Discussion – 6.2. La spécification de l'affordance d'appontabilité

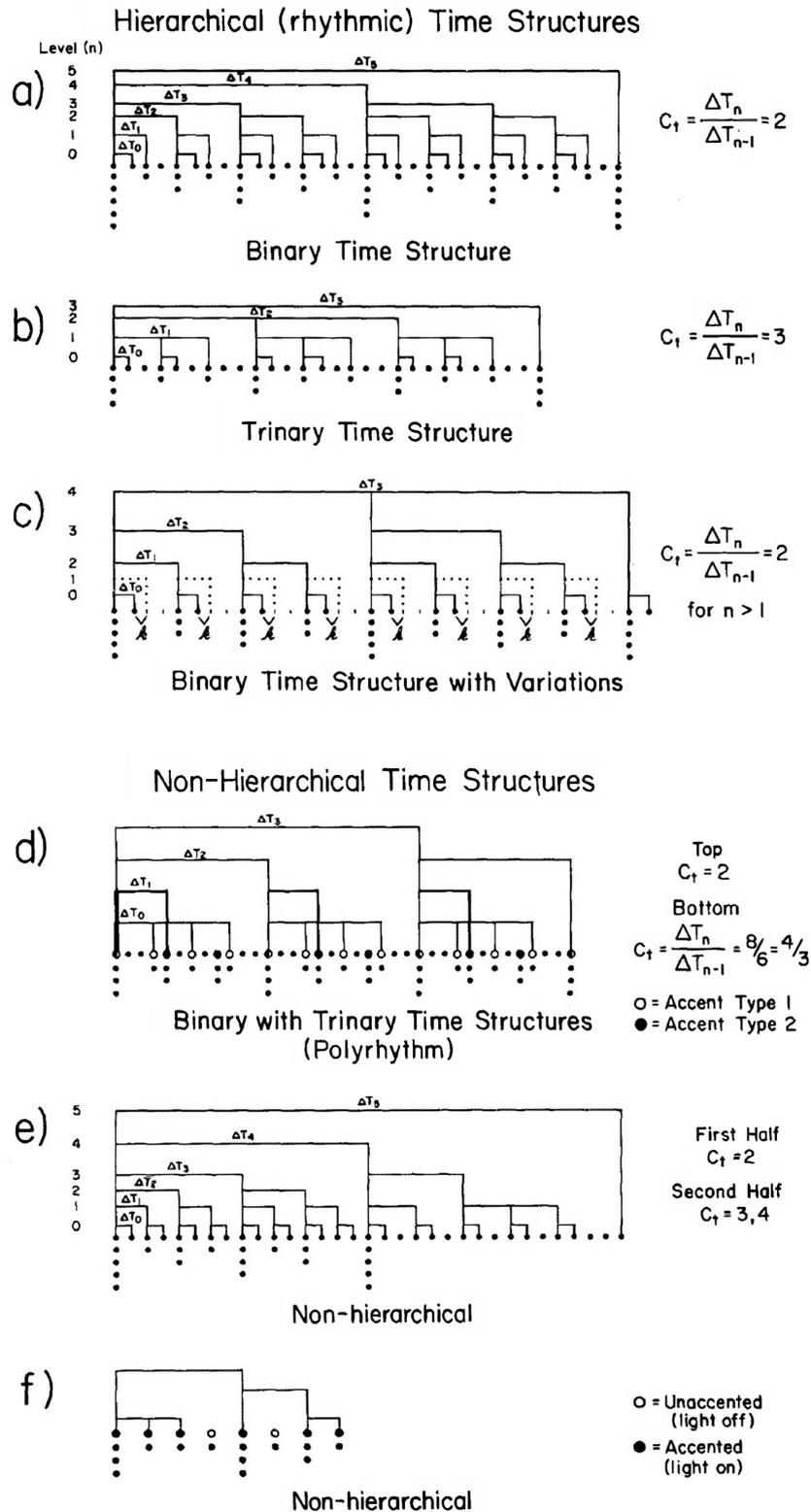


FIGURE 6.2. – Différentes hiérarchies dans les structures sont plus ou moins cohérentes. Reproduit depuis M. R. JONES et BOLTZ 1989

Pour savoir si les résultats de Jones concernant la capacité à anticiper des événements futurs s’appliquent à des pilotes cherchant à anticiper les mouvements d’un navire, il nous faut répondre à plusieurs questions. La première concerne les marqueurs. Quels peuvent être ces marqueurs dans le cas de l’appontage? Remarquons premièrement que Jones ne limite pas sa théorie à la modalité auditive, ses résultats originellement obtenus dans la modalité auditive se généralisent au visuel (YUAN, HU, X. ZHANG et al. 2021) et même au travers de ces deux modalités jointes (TEN OEVER, C. E. SCHROEDER, POEPEL et al. 2014). Ainsi, des marqueurs existent dans cette modalité. De plus, Jones évoque que pour des événements visuels, des changements de direction et/ou de vitesse sont de bons candidats pour remplir la fonction de marqueurs (M. R. JONES et BOLTZ 1989). Ainsi peut-on imaginer que les changements de direction et de vitesse du pont d’envol peuvent être perçus majoritairement via la modalité visuelle et constituer des marqueurs structurant temporellement l’oscillation du pont. On peut imaginer que le moment où le pont s’aligne avec l’horizon est un marqueur. On peut même imaginer des marqueur plus « fonctionnels » comme les fenêtres d’appontage elles-mêmes, ou encore des moments où les possibilités de roll-over et d’énergie seraient cohérentes, qu’elles soient au paroxysme de leurs indisponibilités ou à l’inverse totalement disponibles. Le second point concerne la structure que forment ses marqueurs. Peut-on identifier, dans les mouvements du navire, une hiérarchie, donc nécessairement plusieurs niveaux temporels? C’est-à-dire, les mouvements du navire sont-ils une imbrication cohérente d’événements répétitifs de périodes différentes? L’identification de ces marqueurs potentiels, et in fine la classification de la cohérence de la structure qu’ils forment, requièrent je pense de se tourner vers l’étude de la dynamique du pont. Je veux dire ici qu’il s’agit de s’intéresser à la physique, aux lois déterminant le comportement du navire. En effet, il ne fait aucun doute que la théorie du dynamic attending offre un cadre de réflexion riche qu’il convient d’explorer plus en détails dans le cas de l’appontage et qu’elle pourra être enrichie par les théories des approches dynamiques (BERNSTEIN 1966; SALTZMAN et J. KELSO 1987). En effet, la proximité de l’approche dynamique et de la théorie du dynamic attending est frappante à bien des égards, se retrouvant sur des thèmes comme la synchronisation, le phasage et déphasage de systèmes exhibant des comportements cycliques / oscillatoires, par exemple. Afin de franchir le pas de la théorie à son application pour l’appontage, il semble judicieux de commencer, comme Jones, par comprendre l’objet de la perception, c’est-à-dire la dynamique du navire. La partie 6.2.2 illustre sans exhaustivité comment cette démarche peut enrichir notre compréhension de la cognition des pilotes.

6.2.2. Rôle du couplage dans la spécification multimodale

Nous avons observé que des pilotes experts pratiquant l’appontage tendaient à coupler les déplacements verticaux de leur appareil avec ceux du pont d’envol de la frégate (chapitre 3) et que ce couplage était bénéfique pour la sécurité de la manœuvre. Nous avons évoqué la possibilité que ces mouvements de couplage consisteraient en mouvements exploratoires qui viseraient à prélever de l’information. Suivant cette

6. Discussion – 6.2. La spécification de l’affordance d’appontabilité

idée, le couplage viserait à rendre plus saillantes des propriétés relationnelles dans le flux perceptifs résultant en une perception de l’affordance d’appontabilité plus précise. Il s’agirait ici de générer des variations dans le flux perceptif afin de contraster d’autant plus l’invariant du variant, voire de générer de l’information. Par exemple, Mantel et al (MANTEL, HOPPENOT et COLLE 2012) montrent que la perception de la distance égocentrique à une cible est améliorée lorsque l’observateur est autorisé à générer des mouvements de tête. L’hypothèse est que de tels mouvements permettraient le prélèvement d’une information par le canal visuo-haptique spécifiant la distance de la cible. Un invariant d’ordre supérieur, entre les modalités visuelle et haptique pour spécifier cette distance à la cible, ne serait disponible que lorsque les mouvements d’exploration de la tête seraient permis. Nous pouvons ainsi faire l’hypothèse qu’une information similaire pourrait être à l’œuvre lors de l’appontage. En actionnant les commandes qui génèrent en retour le déplacement vertical de l’hélicoptère, le pilote produit des variations stimulant la modalité haptique mais également un mouvement de l’appareil stimulant les modalités visuelles et vestibulaires. À un angle de flexion du bras actionnant le collectif (modalité haptique) correspond un déplacement (modalité visuelle) de l’appareil par rapport au navire et par rapport au champ de gravité (modalité vestibulaire). Les variations induites dans ces modalités par l’activité aux commandes des pilotes permettraient ainsi d’enrichir l’information spécifiant l’appontabilité en spécifiant, par exemple, les vitesses et les accélérations relatives déterminant en partie l’appontabilité comme indiqué dans l’équation XX. Une telle hypothèse concorde avec les observations de (HUET, JACOBS, CAMACHON et al. 2009) qui montrent un apprentissage plus rapide et de meilleures performances à l’atterrissage lorsque des pilotes peuvent manipuler l’aéronef. Ce premier point concerne donc la spécification de l’affordance, une spécification qui serait multimodale et qui pourrait exhiber une saillance accrue suivant des mouvements de couplage. L’étude du support informationnel de l’affordance, sa spécification, son évolution au cours de mouvements exploratoires de couplage est donc une piste pour les futures expérimentations qui promet d’être passionnante.

D’un point de vue technique, il semble qu’une telle étude pourrait tirer profit de simulateurs à base mobile. En effet, même si la nécessité des bases mobiles pour l’étude du pilotage reste floue (surtout en ce qui concerne les questions d’immersion (WANG, M. WHITE, OWEN et al. 2013), il ne fait nul doute que la possibilité qu’elles offrent d’induire des variations dans le canal haptique / vestibulaire bénéficiera à l’étude de la spécification supposée multimodale. Les simulateurs tels que l’I-Mose d’Euromove à l’université de Montpellier⁷, ou encore l’HELIFLIGHT de l’université de Liverpool (G. D. PADFIELD et M. D. WHITE 2003) ou le Vertical Motion Simulator de la NASA Ames (APONSO, BEARD et J. A. SCHROEDER 2009) seraient des solutions techniques pertinentes dans le cadre de ces possibles futures études.

7. <https://euromov.eu/project/i-mose-lab/>

6.2.3. Invariants optiques candidats

L’affordance d’appontabilité pourrait être spécifiée optiquement par des variables connues en littérature écologique. Nous listons dans les lignes qui suivent, certaines de ces variables optiques qui nous semblent être des candidates pertinentes à la spécification optique de l’affordance.

Pour commencer, la taille qu’occupe un objet dans le champ de vision et ses dérivées temporelles (τ et $\dot{\tau}$) pourraient être impliquées dans la spécification de la distance à la cible (le pont d’envol) et de la vitesse à laquelle cette distance se comble. En effet, le rôle de $\dot{\tau}$ dans la régulation de la conduite de véhicules (David N LEE 1976; G. D. PADFIELD 2011; Denis N LEE 1980) en fait un candidat privilégié. Pour les mêmes raisons, une piste très intéressante est celle de l’angle de dépression (*depression angle*) et l’angle d’évasement (*splay angle*) et leurs dérivés qui sont impliquées dans la régulation du vol à basse altitude (John M. FLACH, Rik WARREN, GARNESSE et al. 1997) car ils sont fonction de l’altitude de l’observateur (John M. FLACH, Rik WARREN, GARNESSE et al. 1997; John M. FLACH, HAGEN et LARISH 1992; WARREN 1988). La relation entre l’altitude et les angles de dépression et d’évasement est illustrée à la figure 6.3

Par exemple ces invariants peuvent être combinés et spécifier la vitesse et la position du navire qui seraient de potentiels marqueurs permettant in fine d’anticiper le comportement du navire (cf. section 6.2.1). On peut par exemple poser l’équation de mouvement suivante

$$V_{navire} = V_{helico} - V_{relative} \quad (6.1)$$

Où V_{navire} est la vitesse verticale du navire dans le repère terrestre, V_{helico} celle de l’hélicoptère et $V_{relative}$ la vitesse relative aux deux objets. En remplaçant par des variables optiques on obtient

$$V_{navire} = \dot{\alpha} - \tau \quad (6.2)$$

Avec $\dot{\alpha}$ la vitesse de variation de l’angle de dépression (ou de façon similaire de l’angle d’évasement) et τ la vitesse de changement de la taille du pont dans le champ de vision. A noter que l’angle d’évasement est défini par rapport à l’horizon, il s’agit de l’angle formé par les lignes des textures et la direction du mouvement au niveau du point de convergence à l’horizon (Rik WARREN 1982). De même l’angle de dépression est défini comme la position angulaire d’une ligne perpendiculaire à la direction du mouvement de l’observateur par rapport à l’horizon (John M. FLACH, HAGEN et LARISH 1992). Or l’environnement maritime dans lequel se déroule l’appontage est un cas où l’horizon est particulièrement disponible, car rares sont les objets à la surface de l’océan qui seraient de taille suffisante pour le masquer de la vue d’un pilote (à l’exception de la météo). De plus, la surface du milieu maritime est ce qui se rapproche le plus du terrain théorique plat et sans fin à partir duquel se sont construites et étudiées les connaissances sur les angles de dépression et d’évasements

(Rik WARREN 1982). De plus la sensibilité à l'angle d'évasement est d'autant plus forte que l'altitude est basse (William H. WARREN 1988). Étant donné que la dernière phase de l'appontage se déroule à altitude absolue et relative basses, il est raisonnable de penser que les angles d'évasement et de dépression soient privilégiés.

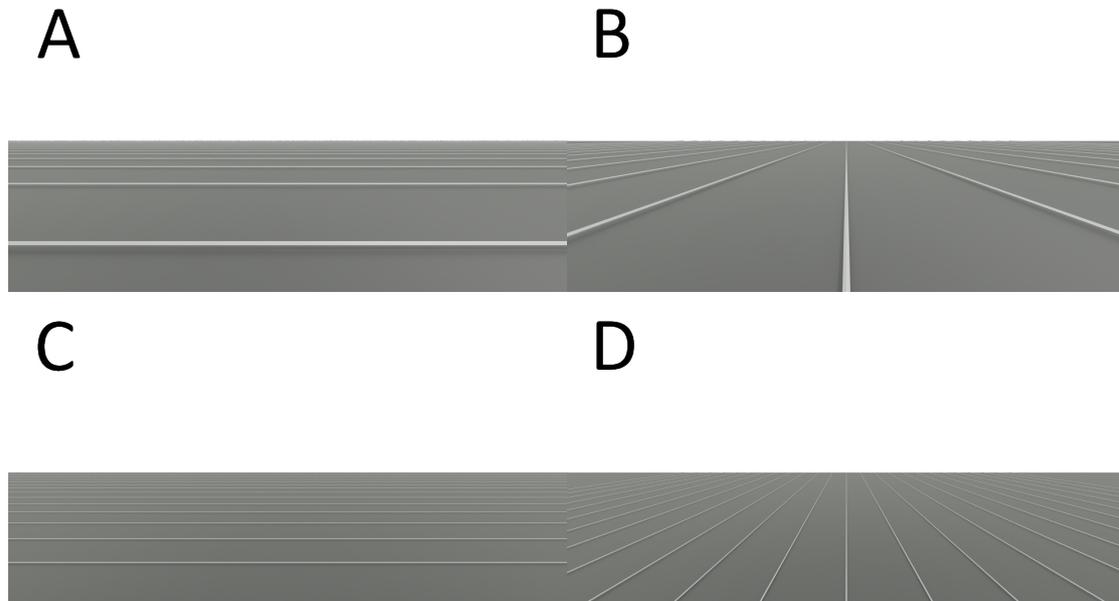


FIGURE 6.3. – Angle d'évasement (B – D) et de dépression (A – C) pour une altitude de 2m (A – B) et 10m (C – D).

6.3. Perspectives

6.3.1. Structure de l'EID : Vers des assistances prenant en compte de multiples contraintes

L'efficacité des principes EID est d'autant plus grande que les outils d'analyses et de descriptions du domaine de travail que cette démarche promeut sont exploités. La description du problème auquel font face les opérateurs et la façon dont cette description détermine le contenu et la structure de l'interface est une richesse de l'EID que nous avons pu apprécier dans cette thèse (cf le chapitre 2 de cette thèse). La démarche EID a été appliquée avec succès pour démontrer ses bénéfices dans l'assistance à la prise de décision dans le chapitre 5 de cette thèse. Cependant, outre les problématiques de minimisation de l'énergie à l'impact, d'autres problématiques ont été révélées par cette analyse du domaine de travail. En effet, la stabilité (*roll-over*) et la précision (apponter sur cible) participent également à la sécurité de l'équipage lors des appontages en situation réelle. Il en résulte qu'une interface visant à assister l'appontage en situation réelle devra le faire en intégrant ces contraintes dans le design. Une telle interface sera donc nécessairement plus complexe que celle présentée au chapitre

5. En effet, d'après la loi de variété requise (ASHBY 1957; KLIR et ASHBY 1991), une interface doit être aussi complexe que le problème qu'elle se propose de résoudre. Nos efforts tendront donc nécessairement vers une assistance plus complexe comme la conception d'interface écologiques en a produit par le passé (LEEGE, M. M. v. PAASSEN, A. C. i. VELD et al. 2013; KLOMP, VAN PAASSEN, Max MULDER et al. 2011; EIJK, C. BORST, A. C. i. ' VELD et al. 2012; Kim J VICENTE et Jens RASMUSSEN 1988; Kim J VICENTE et Jens RASMUSSEN 1990), écologiques ne signifiant pas nécessairement simples ou intuitifs (John M. FLACH 2012).

6.3.2. Développement à partir de la physique du navire

Deux points bénéficient des avancées apportées par les travaux mathématiques et physiques portant sur la dynamique des navires :1) Le premier point porte sur le modèle d'affordance, 2) le second sur sa spécification. Ces deux points étant liés, commençons par le modèle d'affordance car il détermine la spécification qu'on peut en proposer.

1) Dans leurs travaux portant sur le développement d'un algorithme de prédiction, Bolander et Hunsaker (BOLANDER et HUNSAKER 2018) montrent que les mouvements d'un navire sujet à la houle sont une simple somme de fonctions sinusoïdales. Pour rappel, nous avons proposé un modèle d'affordance (eq 4.5) basé en partie sur une dynamique du navire simplifiée, puisque modélisée par une seule fonction sinusoïdale. D'après les travaux de Bolander et Hunsaker, seulement trois sinus pourraient être suffisants pour capturer une dynamique réelle de navire. Ainsi, peut-on imaginer qu'un raffinement dans la formalisation de l'affordance consisterait en une addition de fonctions sinusoïdales supplémentaires à celle déjà prise en compte dans l'équation 4.5. Deux sinusoïdes supplémentaires pourraient suffire à gagner en réalisme sans pour autant détruire la morphologie de l'équation 4.5. En effet, en repartant de cette équation on peut simplement élaborer le terme de vitesse à l'impact lié à la dynamique du navire V_{navire} tel que

$$\begin{aligned} V_{navire} = & A_1 2\pi f_1 \cos(\phi_{actuel} + 2\pi f_1 \Delta_t) \\ & + A_2 2\pi f_2 \cos(\phi_{actuel} + 2\pi f_2 \Delta_t) \\ & + A_3 2\pi f_3 \cos(\phi_{actuel} + 2\pi f_3 \Delta_t) \end{aligned} \quad (6.3)$$

Ici, chaque terme lie des propriétés invariantes de l'oscillation du navire à une vitesse à un instant $0 + \Delta_t$. Ces propriétés invariantes sont les amplitudes (A_1, A_2, A_3) et fréquences (f_1, f_2, f_3) qui sont elles-mêmes déterminées par des caractéristiques des vagues et du navire. On peut alors imaginer qu'un pilote capable d'accéder, d'une manière ou d'une autre, à ces propriétés d'oscillations serait capable « d'anticiper » le comportement du navire, notamment la composante d'oscillation en pilonnement comme exprimée à l'équation 6.3. Dans ce cas, la stratégie de couplage observée chez

des pilotes experts pourrait avoir pour but d’explorer et d’accéder à ces propriétés d’oscillations ($A_1, A_2, A_3, f_1, f_2, f_3$). Dans ce cas, on peut faire le lien avec la théorie du *dynamic attending* développée plus haut. En effet, il existe un lien entre le domaine temporel (auquel appartiennent les descriptions structurelles que forment les marqueurs des sous-événements dans la théorie de Jones) et le domaine fréquentiel auquel appartiennent les A_n et f_n déterminant la vitesse du navire au moment du contact dans l’équation 6.3. S’il est vrai que des signaux différents peuvent produire les mêmes spectres dans le domaine fréquentiel, en revanche, il n’existe qu’un unique spectre pour un signal donné (FOURIER 1822). Ainsi, on peut exprimer les A_n et f_n à partir des marqueurs (au sens où Jones les a définis). Les transformés de Fourier sont des méthodes permettant de passer du domaine temporel au domaine fréquentiel (SNEDDON 1995) et pourraient donc servir de piste pour expliquer comment l’information est perçue par les pilotes. C’est entre autres de cette façon que les questions de spécification peuvent être abordées.

Cette hypothèse est bien entendu soumise à la condition que le système navire-océan exhibe un comportement stable, impliquant des A_n et f_n invariants. Or, maintenant que le concept général a été transmis, nous nous devons d’y apporter quelques nuances. Notamment, d’après (FOURIE et T. JONES 2015), les comportements de navire ne se caractérisent pas toujours par une stabilité suffisante pour être prévisibles. En effet, dans leur cas d’étude, un navire de 70m de long, le signal peut perdre brutalement en cohérence réduisant l’horizon de prédictibilité de 40s à moins de 3s. Cette perte de stabilité peut être capturée par le spectre de pilonnement comme illustré à la figure 6.4.

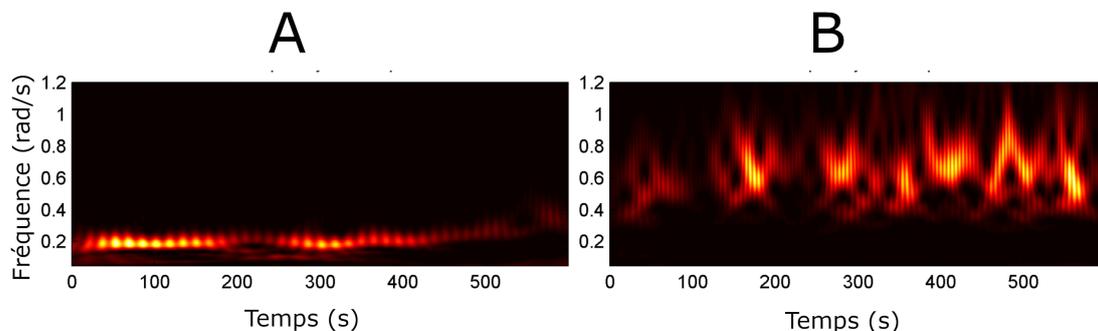


FIGURE 6.4. – Spectre de pilonnement stable (A) et instable (B). Reproduit d’après FOURIE et T. JONES 2015

Il semblerait donc que la prédictibilité du comportement du navire puisse varier, étant parfois stable, donc prévisible, et parfois volatile, donc moins prévisible (c’est-à-dire prévisible moins longtemps à l’avance). Ce constat est stimulant car chargé d’implications pour notre sujet de recherche. Lorsque le comportement est prévisible, alors le *future-oriented attending* présenté précédemment serait permis, il faciliterait d’une part la prise d’informations quant aux comportements du pont (identifier ces

A_n et f_n) et d'autre part, la mise en place du couplage avec ce dernier (puisque les mouvements sont plus facilement anticipés le couplage est d'autant plus facile à mettre en place). Ainsi, une dynamique du pont prévisible entrainerait un appontage plus « facile », que le couplage soit un mouvement exploratoire visant in fine à percevoir précisément l'affordance d'appontabilité ou une stratégie visant à se mettre dans les meilleures conditions pour apponter (en alignant des fenêtres de stabilité et d'énergie à l'impact par exemple), voire les deux en même temps. Au contraire, lorsque le comportement du navire est moins prévisible, il est probable qu'il ne permette pas le *future-oriented attending* (M. R. JONES et BOLTZ 1989). Dans ce cas, c'est un *analytic attending* qui devrait être observé chez les pilotes. Cette façon d'assister aux événements temporels diffère du *future-oriented attending* : les attentes (« prédictions ») quant au déroulement future des événements ne sont pas permises, et ainsi l'*analytic attending* est souvent moins fonctionnel (M. R. JONES et BOLTZ 1989).

Un axe de recherche intéressant serait donc d'observer un effet de la volatilité du spectre de pilonnement sur le comportement des pilotes. Pour un spectre volatil, la structure du signal serait incohérente, donc le comportement des pilotes devrait montrer les caractéristiques d'un *analytic attending*, des difficultés à mettre en place une stratégie de couplage, et in fine à percevoir l'affordance d'appontabilité et/ou des performances diminuées. Un tel résultat concorderait avec les résultats observés au chapitre 3.

Les implications pour la conception d'assistance à l'appontage sont également passionnantes. Si les hypothèses évoquées ci-dessus s'observaient, alors on peut imaginer que l'assistance serait d'autant plus utile que le spectre de pilonnement serait volatil, au point, peut-être, de n'être nécessaire que dans ces cas-là. Identifier en amont la volatilité du spectre permettrait de proposer une assistance adaptative (RICHARDS et LAMB 2016), fournissant l'information nécessaire au moment nécessaire évitant ainsi de submerger le pilote d'informations qu'il n'utilisera pas. Ceci n'est qu'un exemple élaboré à partir d'une infime partie des travaux portant sur la prédiction mathématique de la dynamique du navire. Ces travaux constituent en effet une littérature riche qu'il convient d'approfondir, afin de mieux comprendre ce qu'il y a à percevoir pour mieux comprendre comment la perception a lieu.

6.3.3. Enrichir la méthode EID : la forme

Si la méthodologie EID regorge de méthodes permettant une analyse du domaine de travail complexe (e.g., interview, hiérarchie d'abstraction, etc.), peu d'éléments sont en revanche fournis pour structurer la démarche de visualisation, appelée forme. La forme de l'interface doit véhiculer les informations de manière directe et tirer parti des fortes capacités perceptives humaines en préférant présenter l'information sous la forme d'invariants perceptifs (niveau le plus bas du SRK (Kim J VICENTE et Jens RASMUSSEN 1990)). Bien que fondamentale, cette préconisation ne traite pas de questions plus concrètes telles que le choix de la police, des couleurs, de l'em-

placement et du groupement des éléments d'une interface, ainsi que la navigation entre différents affichages, etc. Cela présente pour le concepteur une opportunité d'imaginer assez librement la forme que prendra l'interface. Le revers de cette liberté est qu'elle peut parfois paraître trop grande, au risque de s'y perdre. Les démarches d'UX et l'UC (*user experience, user centered*), qui fournissent des recommandations rigoureuses sur ces éléments de détails, sont des sources potentielles d'inspiration pour la démarche de conception de la forme (KRUG 2000; D. NORMAN 2013; LIDWELL, HOLDEN et BUTLER 2010). En revanche ces approches ne traitent pas du contenu de façon aussi approfondie que l'approche EID. Il y aurait là une opportunité pour les deux approches de se compléter : l'EID pour le fond et UX/UC pour la forme (en se recoupant à l'intersection du fond et de la forme). Récemment, cette potentialité de nourrir la démarche de conception de l'EID avec l'UC a été suggérée par Revell et collègues sous la forme d'une nouvelle méthode appelée UCEID (*User Centered Ecological Interface Design*, REVELL, LANGDON, M. BRADLEY et al. 2019). De par, leurs fortes orientations vers l'amélioration de l'expérience utilisateur les approches U (UX en tête de fanion) permettraient, je pense, d'améliorer l'acceptabilité des produits EID, les rendant plus attractifs, plus fluides et faciles d'accès, tout en gardant leur fort ancrage dans la réalité du problème que les principes EID permettent de décrire finement. De plus en plus, je pense que la forme et l'élégance d'une interface sont essentielles à sa bonne utilisation, cette observation faisant écho au « quand c'est beau ça fonctionne mieux » de Noam Tractinsky et Masaaki Kurosu & Kaori Kashimura (D. A. NORMAN 2003; TRACTINSKY 1997; TRACTINSKY, KATZ et IKAR 2000; KUROSU et KASHIMURA 1995) qui montrèrent déjà en 1995, que des interfaces à l'esthétique plus soignée étaient perçues comme fonctionnant mieux par les utilisateurs (cf DION, BERSCHIED et WALSTER 1972; LANGLOIS, KALAKANIS, RUBENSTEIN et al. 2000, pour les fondements scientifiques du biais d'attraction).

6.3.4. Proposition d'évolution de l'interface

La formalisation de l'affordance d'appontabilité nous a permis de proposer une interface d'aide à la prise de décision (chapitre 3) dans un cas restreint où les possibilités d'action des participants étaient limitées à une seule portance. Une évolution de cette interface est donc requise afin de correspondre aux situations réelles rencontrées lors de l'appontage. En premier lieu, cela consiste naturellement à couvrir la gamme entière de portances disponibles. Ici encore, le design de l'assistance présentée à la figure 6.5, se nourrit de la formalisation de l'affordance (eq 4.5). On retrouve sur cette proposition d'assistance une barre de vitesse à l'impact exprimée en fonction de la position de la commande de pas collectif. Il s'agit ici de reprendre les représentations de l'affordance d'énergie à l'impact proposées au chapitre 4. Ainsi, la couleur de cette barre est fonction de la vitesse (et donc de l'énergie) à l'impact. S'y ajoutent trois éléments : le premier est une projection du TTC (*time to contact*, i.e. temps restant avant l'impact) qui reprend le critère de minimiser le temps de complétion de l'appontage, et qui vise également à procurer plus de visibilité au pilote sur l'évolution des conditions d'appontages; dans cette même philosophie, les éléments numérotés

2 et 3 visent respectivement à indiquer formellement au pilote la vitesse d'impact et la position de la commande de pas collectif. Une telle assistance montre les propriétés suivantes :

1. Si la jauge n'est pas remplie de couleur, alors il existe nécessairement une portance qui permet d'éviter le pont, reprendre de l'altitude et tenter une manœuvre (*wave off*). Il existe donc nécessairement une portance permettant de se poser dans les conditions de vitesses à l'impact sûres.
2. Cette information est reprise par le TTC. Si aucun TTC n'est projeté sur l'axe dédié (5), alors il existe une portance permettant d'éviter le pont etc.
3. Lorsque le TTC se rapproche de la jauge (et donc du temps d'impact), alors l'impact est de plus en plus imminent.
4. Lorsque la jauge est pleine, et le TTC couvre donc toute la gamme de portances possibles, alors l'impact est inévitable, et le pilote devrait chercher à rejoindre une portance permettant de se poser dans limites de sécurité, ou s'en rapprochant le plus, la manœuvre d'évitement n'étant plus disponible.

Cette proposition devrait soutenir le pilote en situations plus réalistes, dans sa prise de décision et dans la régulation de la manœuvre. Néanmoins, elle doit bien évidemment être validée expérimentalement et améliorée par la prise en compte des autres critères de réussite qui ont été identifiés au chapitre 2 (stabilité et précision). Néanmoins, la méthode employée dans cette thèse pour élaborer et tester une interface semble prometteuse pour aborder ces deux points.

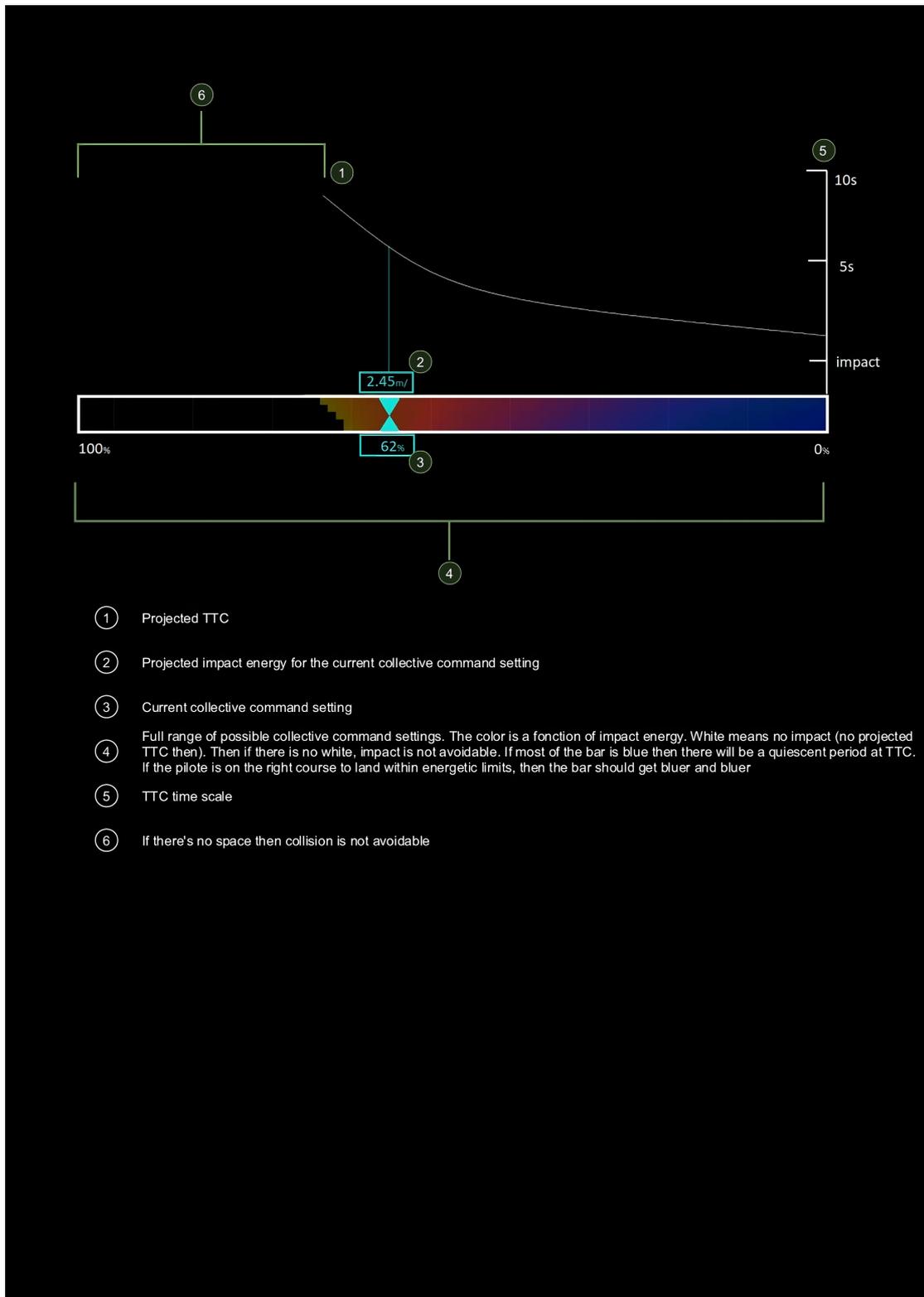


FIGURE 6.5. – Proposition d'évolution de l'assistance basée sur le modèle d'affordance.

6.3.5. Elargir aux autres phases de l'appontage

L'analyse du domaine de travail (chapitre 2) a permis de mettre en évidence que l'appontage est constitué de plusieurs phases successives. Pour rappel, deux grandes phases semblent se succéder. La première est une phase de descente, consistant à rejoindre le point de stationnaire, en suivant un profile de vitesse et de pente de descente commandé. La seconde est une phase de stationnaire et de poser visant à identifier le moment opportun pour déclencher le poser et engager le pont. La distinction de ces deux phases est en accord avec HERRY 2010; MINOTRA et Karen M FEIGH 2018; K.S. BERBAUM, R.S. KENNEDY et HETTINGER 1991; TUŠL, RAINIERI, FRABONI et al. 2020; PRITCHARD, WALLACE, TRITSCHLER et al. 2016 qui montrent une même division de l'appontage d'hélicoptère. Dans cette thèse nous avons focalisé nos recherches sur la seconde phase, celle de stationnaire et poser. Deux raisons justifient ce choix. La première est celle du risque. En aéronautique plus la manœuvre est proche du sol et des obstacles plus elle est dangereuse (cf les enveloppes de vol au chapitre 2). Assister le pilote dans les conditions les plus périlleuses est une priorité. La seconde raison se rapporte à des aspects plus fondamentaux. L'instabilité du point de poser (le pont d'envol) est une spécificité de l'appontage qui en fait un cas d'étude riche et passionnant tant du point de vue de la cognition que de celui de la conception d'assistances. Cependant, l'étude de l'appontage doit inclure ces deux phases. En effet ces deux phases ne sont pas indépendantes du point de vue de la cognition. Les difficultés éprouvées lors de la phase d'approche pourraient se répercuter lors de la phase de stationnaire, notamment parce que les capacités cognitives des pilotes peuvent être fortement éprouvées et diminuées par une fatigue liée à une phase d'approche difficile. Des interfaces reprenant le concept de *tunnel in the sky display* (Max MULDER 1999) peuvent être appliquées à la phase d'approche de l'appontage (ZEILSTRA, REUS et KONING 2015; TANJA MARTINI, PHILLIPP MEVENKAMP, NIKLAS PEINECKE et al. 2022) comme illustré à la figure 6.6 et constituent des pistes prometteuses pour assister les pilotes dans cette phase de l'appontage.

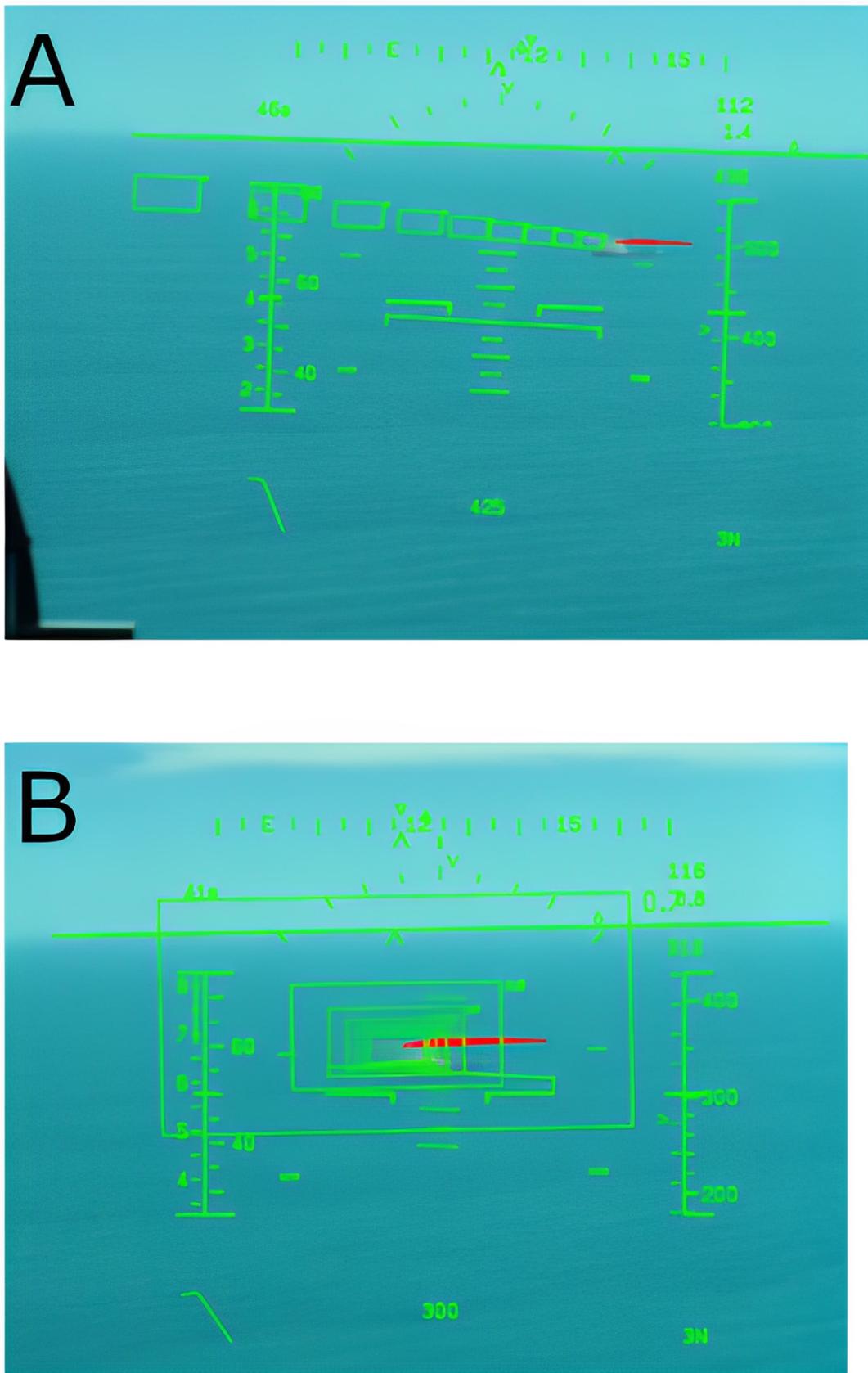


FIGURE 6.6. – *Tunnel in the sky display* pour une pente d'approche de degrés, vu de profil (A) et de l'intérieur (B). Reproduit depuis ZEILSTRA, REUS et KONING 2015.

Conclusion

Dans cette thèse notre objectif était de proposer et tester un concept d'assistance visuelle pour l'appontage, fondé sur l'étude de la cognition des pilotes appontant sur navires soumis à la houle. Le travail réalisé dans cette thèse permet de conclure qu'une assistance visuelle conçue écologiquement de façon à souligner les affordances pertinentes du domaine de travail est une solution efficace pour améliorer la sécurité lors de l'appontage.

L'importance du concept d'affordance dans la littérature écologique — tant dans le domaine de la conception d'interface que dans celui de l'étude de la cognition — a guidé notre travail de recherche et permis d'établir l'hypothèse selon laquelle 1) la formalisation de l'affordance d'appontabilité devrait capturer le comportement à l'appontage et 2) une assistance représentant l'affordance et sa dynamique / son évolution devrait améliorer la sécurité de cette tâche périlleuse. Ce raisonnement en deux étapes devait encrer le concept d'assistance dans les mécanismes cognitifs à l'oeuvre lors de l'appontage et garantir sa robustesse et son efficacité.

Afin de tester ces hypothèses nous avons, dans un premier temps, réalisé l'étude qualitative visant à définir le domaine de travail des pilotes à l'appontage. Cette étude ayant pour sources principales la littérature scientifique et technique pertinente, ainsi que des entretiens avec des pilotes aguerris, nous permet de conclure que l'appontage est une succession de phases ayant chacune leurs propres critères de réussite et contraintes. Par la suite nous avons décidé de focaliser nos efforts sur la dernière phase de la manoeuvre — la phase de stationnaire et poser — qui est unique et caractéristique de l'appontage. Lors de cette phase se déroulant à proximité du pont d'envol, nous avons identifié que les critères de réussite impliquent de toucher le pont avec précision, équilibre, et dans des limites de vitesses acceptables.

Nous avons poursuivi la phase d'exploration de l'appontage par l'étude empirique du comportement de pilotes experts appontant sur navire soumis à la houle, en environnement virtuel. Armé des connaissances acquises lors de l'analyse du domaine de travail, cette seconde étude a mis en évidence une stratégie de pilotage efficace permettant aux pilotes de satisfaire le critère de vitesses d'impact précédemment identifiée lors de la première étape (analyse du domaine de travail). En effet, nous avons observé qu'une stratégie de couplage pendant laquelle le pilote synchronise les déplacements verticaux de son appareil avec ceux du navire est efficace : lorsqu'elle est employée, la vitesse d'impact (critère de réussite) lors du toucher du pont est réduite. De plus, la mise en place de la stratégie correspond à l'entrée dans la phase

de stationnaire et poser, et s'intensifie avec le niveau de mer et souligne ainsi d'autant plus la division en phases identifiée lors de l'analyse du domaine de travail.

Nous avons par la suite approfondi notre travail sur cette problématique de la vitesse de poser. Plus précisément, nous avons formalisé et modélisé les possibilités de poser dans les limites de vitesses sûres en tant qu'affordance d'appontabilité. La modélisation — qui offre une visualisation de de l'affordance d'appontabilité — nous a permis 1) d'étudier numériquement l'effet d'une stratégie de couplage sur la topologie de l'affordance d'appontabilité et 2) d'établir des prédictions quant à l'instant et la portance choisies pour apponter. Concernant l'effet d'une stratégie de couplage (1), des conclusions claires sont difficiles à tirer pour le moment. Cependant cette démarche de simulation numérique devrait être reproduite en intégrant la modélisation des affordances relatives aux autres critères de réussites identifiés, à savoir la précisons et l'équilibre du poser. Concernant la possibilité de prédire le comportement d'appontage (2), la modélisation fait apparaître un paysage composé de vallées de faibles vitesses d'impact, supposé avoir l'effet d'attracteurs concentrant les décisions d'apponter, et des pics de vitesses d'impact plus élevées, suggérant des conditions dans lesquelles les décisions de reprise d'altitude devraient se multiplier et les décisions de poser se raréfier.

L'étude empirique du comportement d'appontage en environnement virtuel visait à 1) tester la capacité du modèle d'affordance à prédire les décisions de poser un hélicoptère dans les limites de vitesse sûres, sur un navire soumis à la houle et 2) tester l'efficacité d'une assistance visuelle permettant de visualiser l'affordance d'appontabilité, sous forme graphique. Les résultats montrent que le modèle d'affordance capture les décisions des participants. En effet, les décisions d'apponter sont majoritairement prises dans ou à proximité des vallées de faibles vitesses d'impact (qui agissent donc bel et bien tels des attracteurs sur le comportement des participants) tandis que les décisions d'abandonner la manoeuvre d'appontage et reprendre de l'altitude sont majoritaires à proximité des pics (qui agissent donc bien comme des repousseurs). De plus, l'assistance visuelle accentue cet effet des attracteurs et repousseurs : le poser est déclenché d'autant plus proche des conditions permettant de poser à vitesse minimale, et l'abandon de la manoeuvre est plus fréquent lorsque les conditions ne permettent pas un poser sûr. En somme, L'assistance visuelle améliore bien la sécurité de la manoeuvre car elle permet une distinction claire entre les situations autorisant un poser sûr, de celles ne l'autorisant pas.

Ainsi, le travail réalisé dans cette thèse marque les premiers pas d'une étude en profondeur de l'appontage au regard des approches écologiques. La complexité de l'appontage est un challenge pour les sciences de la cognition, challenge que l'approche écologique a permis de relever grâce à des outils théoriques pertinent, permettant l'analyse qualitative du domaine de travail et l'étude quantitative du comportement. Plus précisément, nous avons pu apprécier la puissance du concept d'affordance tant pour la conception d'assistance que pour l'étude de la cognition en générale. En effet,

les résultats soulignent la pertinence de l'approche pour l'étude et l'assistance de comportements complexes en situations immersives et écologiques.

L'ensemble des développements théoriques ayant servi de base à la formalisation de l'affordance d'appontabilité pourront être reproduits et affinés. Le travail actuel s'est en effet concentré sur un aspect restreint de l'appontage en adressant la problématique de vitesse d'impact dans la dernière phase d'une manoeuvre en comprenant plusieurs. Les autres phases du vol ainsi que les autres problématiques qui y sont associées pourront être abordées de façon similaire à celle présentée dans cette thèse, en intégrant l'aspect opérationnel lors de l'analyse du domaine de travail et en l'approfondissant par la simulation. De même, des testes en environnement virtuels permettront de valider scientifiquement des assistances conçues sur la base de l'étude du comportement lors de l'appontage. Les perspectives d'amélioration et de diversification des modèles et des assistances sont nombreuses et prometteuses pour l'amélioration de la sécurité dans ce domaine à fort enjeux qu'est l'appontage.

Bibliographie

- [AKB88] GO ALLGOOD, RS KENNEDY et KS BERBAUM. « Very-low-frequency vibration in a motion-base helicopter simulator compared to the simulated platform ». In : *The Journal of the Acoustical Society of America* 84.S1 (1988), S26-S26 (cf. p. 122).
- [Ame02] Matthijs H J AMELINK. « Visual Control Augmentation by presenting Energy Management Information in the Primary Flight Display ». In : (sept. 2002), p. 161 (cf. p. 19, 27).
- [AF03] Matthijs H J AMELINK et John M FLACH. « TOTAL ENERGY-BASED PERSPECTIVE FLIGHT PATH DISPLAY FOR AIRCRAFT GUIDANCE ALONG COMPLEX APPROACH TRAJECTORIES ». In : (2003), p. 6 (cf. p. 19, 27, 45, 46, 126).
- [Ame10] Matthijs Hendrik Jan AMELINK. *Ecological automation design, extending work domain analysis*. OCLC : 840440095. S.l. : s.n., 2010. ISBN : 978-90-90-25642-9 (cf. p. 68, 126).
- [AID18] Alexey ANOKHIN, Alexey IVKIN et Sergey DOROKHOVICH. « Application of ecological interface design in nuclear power plant (NPP) operator support system ». In : *Nuclear Engineering and Technology* 50.4 (mai 2018), p. 619-626. ISSN : 17385733. DOI : 10.1016/j.net.2018.03.005. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1738573318300822> (visité le 21/02/2023) (cf. p. 19).
- [ABS09] Bimal L APONSO, Steven D BEARD et Jeffery A SCHROEDER. « The NASA Ames Vertical Motion Simulator—A Facility Engineered for Realism ». In : *studies* 3 (2009). Publisher : Citeseer, p. 4 (cf. p. 134).
- [Ash57] W Ross ASHBY. « An introduction to cybernetics ». In : (1957). Publisher : Chapman & Hall Ltd. (cf. p. 137).
- [ACC+17] Muhammad AZAM, Gyoo-Jae CHOI, Hyun-Chae CHUNG et al. « Perception of affordance in children and adults while crossing road between moving vehicles ». In : *Psychology* 8.07 (2017), p. 1042 (cf. p. 23).
- [Bak+11] Susan P. BAKER, Dennis F. SHANAHAN, Wren HAALAND et al. « Helicopter Crashes Related to Oil and Gas Operations in the Gulf of Mexico ». In : *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 82.9 (1^{er} sept. 2011). Number : 9, p. 885-889. ISSN : 00956562. DOI : 10.3357/ASEM.3050.2011. URL : <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&iissn=0095-6562&volume=82&issue=9&spage=885> (visité le 06/06/2019) (cf. p. 40).

- [BT04] Simon BANBURY et Sébastien TREMBLAY, éd. *A Cognitive approach to situation awareness : theory and application*. Burlington, VT : Ashgate Pub, 2004. 359 p. ISBN : 978-0-7546-4198-8 (cf. p. 21, 25, 39).
- [BFM10] Julien BASTIN, Brett R. FAJEN et Gilles MONTAGNE. « Controlling speed and direction during interception : an affordance-based approach ». In : *Experimental Brain Research* 201.4 (avr. 2010), p. 763-780. ISSN : 0014-4819, 1432-1106. DOI : [10.1007/s00221-009-2092-y](https://doi.org/10.1007/s00221-009-2092-y). URL : <http://link.springer.com/10.1007/s00221-009-2092-y> (visité le 29/09/2022) (cf. p. 23).
- [BF11] Kevin B. BENNETT et John M. FLACH. *Display and Interface Design : Subtle Science, Exact Art*. 0^e éd. CRC Press, 9 mars 2011. ISBN : 978-0-429-14980-1. DOI : [10.1201/b10774](https://doi.org/10.1201/b10774). URL : <https://www.taylorfrancis.com/books/9781420064391> (visité le 25/03/2022) (cf. p. 20, 27-29, 127).
- [BKH91] K.S. BERBAUM, R.S. KENNEDY et L.J. HETTINGER. « Visual tasks in helicopter shipboard landing ». In : *Applied Ergonomics* 22.4 (août 1991). Number : 4, p. 231-239. ISSN : 00036870. DOI : [10.1016/0003-6870\(91\)90226-8](https://doi.org/10.1016/0003-6870(91)90226-8). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0003687091902268> (visité le 06/06/2019) (cf. p. 41, 55, 61, 67, 69, 143).
- [Ber66] Nikolai BERNSTEIN. « The co-ordination and regulation of movements ». In : *The co-ordination and regulation of movements* (1966). Publisher : Pergamon press (cf. p. 105, 133).
- [Ber98] Irene BERRY. « Dynamic Rollover ». In : (1998), p. 4 (cf. p. 128).
- [BH18] Christian R. BOLANDER et Douglas F. HUNSAKER. « A Sine-Summation Algorithm for the Prediction of Ship Deck Motion ». In : *OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston*. OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston. Charleston, SC : IEEE, oct. 2018, p. 1-10. ISBN : 978-1-5386-4814-8. DOI : [10.1109/OCEANS.2018.8604888](https://doi.org/10.1109/OCEANS.2018.8604888). URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8604888/> (visité le 27/01/2020) (cf. p. 137).
- [BMV10] C. BORST, M. MULDER et M. M. VAN PAASSEN. « Design and Simulator Evaluation of an Ecological Synthetic Vision Display ». In : *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 33.5 (sept. 2010). Number : 5, p. 1577-1591. ISSN : 0731-5090, 1533-3884. DOI : [10.2514/1.47832](https://doi.org/10.2514/1.47832). URL : <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.47832> (visité le 08/09/2021) (cf. p. 19).
- [Bor+08] C. BORST, F. A. SJER, M. MULDER et al. « Ecological Approach to Support Pilot Terrain Awareness After Total Engine Failure ». In : *Journal of Aircraft* 45.1 (jan. 2008). Number : 1, p. 159-171. ISSN : 0021-8669, 1533-3868. DOI : [10.2514/1.30214](https://doi.org/10.2514/1.30214). URL : <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.30214> (visité le 08/09/2021) (cf. p. 19, 126).

- [BFE15] Clark BORST, John M. FLACH et Joost ELLERBROEK. « Beyond Ecological Interface Design : Lessons From Concerns and Misconceptions ». In : *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 45.2 (avr. 2015). Number : 2, p. 164-175. ISSN : 2168-2291, 2168-2305. DOI : [10.1109/THMS.2014.2364984](https://doi.org/10.1109/THMS.2014.2364984). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/6963425/> (visité le 06/06/2019) (cf. p. 21).
- [Bur+07] Catherine BURNS, Greg JAMIESON, Gyrd SKRAANING et al. « Supporting Situation Awareness Through Ecological Interface Design ». In : *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 51.4 (1^{er} oct. 2007). Publisher : SAGE Publications Inc, p. 205-209. ISSN : 2169-5067. DOI : [10.1177/154193120705100413](https://doi.org/10.1177/154193120705100413). URL : <https://doi.org/10.1177/154193120705100413> (visité le 21/02/2023) (cf. p. 19).
- [Bur+08] Catherine M. BURNS, Gyrd SKRAANING, Greg A. JAMIESON et al. « Evaluation of Ecological Interface Design for Nuclear Process Control : Situation Awareness Effects ». In : *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 50.4 (août 2008), p. 663-679. ISSN : 0018-7208, 1547-8181. DOI : [10.1518/001872008X312305](https://doi.org/10.1518/001872008X312305). URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1518/001872008X312305> (visité le 20/10/2022) (cf. p. 19).
- [BJL18] Rolf BYE, Stig JOHNSEN et Grethe LILLEHAMMER. « Addressing Differences in Safety Influencing Factors—A Comparison of Offshore and Onshore Helicopter Operations ». In : *Safety* 4.1 (17 jan. 2018), p. 4. ISSN : 2313-576X. DOI : [10.3390/safety4010004](https://doi.org/10.3390/safety4010004). URL : <http://www.mdpi.com/2313-576X/4/1/4> (visité le 19/04/2023) (cf. p. 53).
- [Car+89] Claudia CARELLO, Alexis GROSOFSKY, Francene D REICHEL et al. « Visually perceiving what is reachable ». In : *Ecological psychology* 1.1 (1989). Publisher : Taylor & Francis, p. 27-54 (cf. p. 23).
- [CT00] Claudia CARELLO et Michael T TURVEY. « Rotational invariants and dynamic touch ». In : *Touch, representation and blindness* (2000), p. 27-66 (cf. p. 35).
- [CF06] D. CARICO et B. FERRIER. « Evaluating Landing Aids to Support Helicopter/Ship Testing and Operations ». In : *2006 IEEE Aerospace Conference*. 2006 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA : IEEE, 2006, p. 1-13. ISBN : 978-0-7803-9545-9. DOI : [10.1109/AERO.2006.1656019](https://doi.org/10.1109/AERO.2006.1656019). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/1656019/> (visité le 29/10/2019) (cf. p. 39).
- [Car86] D CARR. *Time, history and narrative*. 1986 (cf. p. 24).
- [CD67] M CHIDAMBARA et E j DAVISON. « On " A method for simplifying linear dynamic systems" ». In : *IEEE Transactions on automatic control* 12.1 (1967), p. 119-121 (cf. p. 96).

- [CD19] CHRISTOPHER C PAGANO et Brian DAY. « Ecological interface design inspired by “The meaningful environment » ». In : *Perception as Information Detection*. Routledge, 2019, p. 37-50. URL : https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=_N-sDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA37&dq=ecological+interface+design&ots=Cz8-Lzv6Mq&sig=6BsELrbU_MdYesinT5V908qJQvM (cf. p. 22, 124).
- [Col06] Sean Thomas COLLIER. « Improved Flight Test Techniques for Evaluating Control Margins in the Shipboard Environment ». In : (2006), p. 62 (cf. p. 39).
- [Dan18] Binh DANG-VU. « SHIPBOARD LANDING PERIOD BASED ON DYNAMIC ROLLOVER RISK PREDICTION ». In : (2018), p. 12 (cf. p. 128).
- [Def06] Department of DEFENSE UNITED STATES OF AMERICA. *NATOPS Flight Manual SH-60B*. NATOPS Flight manual A1-H60BB-NFM-000. 2006 (cf. p. 39).
- [DW98] Frederick J DIEDRICH et William H WARREN JR. « The dynamics of gait transitions : Effects of grade and load ». In : *Journal of motor behavior* 30.1 (1998), p. 60-78 (cf. p. 105).
- [DBW72] Karen DION, Ellen BERSCHIED et Elaine WALSTER. « What is beautiful is good. » In : *Journal of personality and social psychology* 24.3 (1972), p. 285 (cf. p. 140).
- [Dix+19] James A. DIXON, Dilip KONDEPUDI, Franck TILL et al. « Self-Organization for Behavioral Scientists Workshop. » Center for the Ecological Study of Perception & Action (CESPA), UCON, USA. 2019. URL : <https://cespa.uconn.edu/selforgsummer2019/> (cf. p. 3).
- [DL45] Karl DUNCKER et Lynne S LEES. « On problem-solving ». In : *American Psychological Association* (1945). URL : <https://doi.org/10.1037/h0093599> (cf. p. 21).
- [Eij+12] A. van der EIJK, C. BORST, A. C. in 't VELD et al. « Assisting Air Traffic Controllers in Planning and Monitoring Continuous-Descent Approaches ». In : *Journal of Aircraft* 49.5 (sept. 2012), p. 1376-1390. ISSN : 0021-8669, 1533-3868. DOI : 10.2514/1.C031686. URL : <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.C031686> (visité le 05/04/2023) (cf. p. 137).
- [EN20] Ben ELIX et Neelam NAIKAR. « Designing for Adaptation in Workers' Individual Behaviors and Collective Structures With Cognitive Work Analysis : Case Study of the Diagram of Work Organization Possibilities ». In : *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* (10 fév. 2020), p. 001872081989351. ISSN : 0018-7208, 1547-8181. DOI : 10.1177/0018720819893510. URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0018720819893510> (visité le 26/02/2020) (cf. p. 30, 31).

- [Ell+13] J. ELLERBROEK, K. C. R. BRANTEGEM, M. M. van PAASSEN et al. « Design of a Coplanar Airborne Separation Display ». In : *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 43.3 (mai 2013). Number : 3, p. 277-289. ISSN : 2168-2291, 2168-2305. DOI : [10.1109/TSMC.2013.2242888](https://doi.org/10.1109/TSMC.2013.2242888). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/6472769/> (visité le 12/11/2021) (cf. p. 19).
- [End95] Mica R ENDSLEY. « A taxonomy of situation awareness errors ». In : *Human factors in aviation operations* 3.2 (1995). Publisher : Aldershot, England : Avebury Aviation, Ashgate Publishing Ltd, p. 287-292 (cf. p. 18).
- [EG00] Mica R. ENDSLEY et Daniel J. GARLAND. « Pilot Situation Awareness Training in General Aviation ». In : *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 44.11 (juill. 2000), p. 357-360. ISSN : 2169-5067, 1071-1813. DOI : [10.1177/154193120004401107](https://doi.org/10.1177/154193120004401107). URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/154193120004401107> (visité le 16/02/2023) (cf. p. 18, 40).
- [FAA03] Federal Aviation Authority FAA. « Standard Operating Procedures for Flight Deck Crewmembers ». In : *Advisory Circular* 120 (2003) (cf. p. 40).
- [Faj08] B. R. FAJEN. « Perceptual learning and the visual control of braking ». In : *Perception & Psychophysics* 70.6 (1^{er} août 2008). Number : 6, p. 1117-1129. ISSN : 0031-5117, 1532-5962. DOI : [10.3758/PP.70.6.1117](https://doi.org/10.3758/PP.70.6.1117). URL : <http://www.springerlink.com/index/10.3758/PP.70.6.1117> (visité le 06/06/2019) (cf. p. 23).
- [Faj07] Brett R FAJEN. « Rapid recalibration based on optic flow in visually guided action ». In : *Experimental Brain Research* 183 (2007), p. 61-74 (cf. p. 124).
- [Faj05] Brett R. FAJEN. « Calibration, Information, and Control Strategies for Braking to Avoid a Collision. » In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 31.3 (2005). Number : 3, p. 480-501. ISSN : 1939-1277, 0096-1523. DOI : [10.1037/0096-1523.31.3.480](https://doi.org/10.1037/0096-1523.31.3.480). URL : <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-1523.31.3.480> (visité le 06/06/2019) (cf. p. 23, 104).
- [FRT08] Brett R. FAJEN, M. A. RILEY et Michael T. TURVEY. « Information, affordances, and the control of action in sport ». In : *Ecological approaches to cognition and action in sport and exercise : Ask not only what you do, but where you do it*. international Journal of sport psychology. T. 40. 2008, p. 79-107 (cf. p. 23, 24).
- [FK20] Johannes FALNES et Adi KURNIAWAN. *Ocean waves and oscillating systems : linear interactions including wave-energy extraction*. T. 8. Cambridge university press, 2020 (cf. p. 129).

- [FF11] Aaron J FATH et Brett R FAJEN. « Static and dynamic visual information about the size and passability of an aperture ». In : *Perception* 40.8 (2011). Publisher : SAGE Publications Sage UK : London, England, p. 887-904 (cf. p. 23).
- [FTA17] José Márcio Pereira FIGUEIRA, Armin TAGHIZAD et Malek ABID. « THE USE OF SIMULATION TOOLS TO ESTIMATE SHIP/HELICOPTER OPERATING LIMITATIONS - PILOT MODEL AND WORKLOAD PREDICTION COMPONENTS ». In : (16 nov. 2017), p. 14 (cf. p. 26, 55, 69).
- [FV17] J. FLACH et F. VOORHORST. *What Matters? : Putting Common Sense to Work*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2017. ISBN : 978-1-5423-6083-8. URL : <https://books.google.fr/books?id=94XtnAAACAAJ> (cf. p. 20, 21).
- [FW18] John M FLACH et Rik WARREN. « Low-altitude flight ». In : *Local applications of the ecological approach to human-machine systems*. CRC Press, 2018, p. 65-103 (cf. p. 126).
- [Fla12] John M. FLACH. « Complexity : learning to muddle through ». In : *Cognition, Technology & Work* 14.3 (sept. 2012), p. 187-197. ISSN : 1435-5558, 1435-5566. DOI : 10.1007/s10111-011-0201-8. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s10111-011-0201-8> (visité le 05/04/2023) (cf. p. 137).
- [FHL92] John M. FLACH, Brent A. HAGEN et John F. LARISH. « Active regulation of altitude as a function of optical texture ». In : *Perception & Psychophysics* 51.6 (nov. 1992), p. 557-568. ISSN : 0031-5117, 1532-5962. DOI : 10.3758/BF03211653. URL : <http://link.springer.com/10.3758/BF03211653> (visité le 05/04/2023) (cf. p. 135).
- [Fla+97] John M. FLACH, Rik WARREN, Sheila A. GARNES et al. « Perception and control of altitude : Splay and depression angles. » In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 23.6 (1997), p. 1764-1782. ISSN : 1939-1277, 0096-1523. DOI : 10.1037/0096-1523.23.6.1764. URL : <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-1523.23.6.1764> (visité le 04/04/2023) (cf. p. 135).
- [Fod68] Jerry A FODOR. « Psychological explanation : An introduction to the philosophy of psychology ». In : (1968) (cf. p. 22).
- [FJ15] Chris FOURIE et Thomas JONES. « Augmenting the helicopter-ship dynamic interface using an autonomous safe-landing prediction scheme ». In : *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Denver, CO, USA : IEEE, juin 2015, p. 26-33. ISBN : 978-1-4799-6010-1. DOI : 10.1109/ICUAS.2015.7152271. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7152271/> (visité le 15/06/2022) (cf. p. 93, 138).

- [Fou22] Jean Baptiste Joseph FOURIER. *Théorie analytique de la chaleur*. Firmin Didot, 1822 (cf. p. 138).
- [FA14] John FRANCHAK et Karen ADOLPH. « Affordances as Probabilistic Functions : Implications for Development, Perception, and Decisions for Action ». In : *Ecological Psychology* 26.1 (2014). Publisher : Routledge _eprint : <https://doi.org/10.1080/10407413.2014.874923>, p. 109-124. DOI : [10.1080/10407413.2014.874923](https://doi.org/10.1080/10407413.2014.874923). URL : <https://doi.org/10.1080/10407413.2014.874923> (cf. p. 122).
- [Fri+20] Daniel FRIESEN, Marilena D. PAVEL, Clark BORST et al. « Design and Evaluation of a Constraint-Based Head-Up Display for Helicopter Obstacle Avoidance During Forward Flight ». In : *AIAA Scitech 2020 Forum*. AIAA Scitech 2020 Forum. Orlando, FL : American Institute of Aeronautics et Astronautics, 6 jan. 2020. ISBN : 978-1-62410-595-1. DOI : [10.2514/6.2020-0667](https://doi.org/10.2514/6.2020-0667). URL : <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2020-0667> (visité le 15/01/2020) (cf. p. 19).
- [Gav91] William W. GAVER. « Technology affordances ». In : *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems Reaching through technology - CHI '91*. the SIGCHI conference. New Orleans, Louisiana, United States : ACM Press, 1991, p. 79-84. ISBN : 978-0-89791-383-6. DOI : [10.1145/108844.108856](https://doi.org/10.1145/108844.108856). URL : <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=108844.108856> (visité le 04/10/2022) (cf. p. 28, 69, 72).
- [Gib14] James J. GIBSON. *The Ecological Approach to Visual Perception : Classic Edition*. 1^{re} éd. Psychology Press, 20 nov. 2014. ISBN : 978-1-315-74021-8. DOI : [10.4324/9781315740218](https://doi.org/10.4324/9781315740218). URL : <https://www.taylorfrancis.com/books/9781315740218> (visité le 05/05/2022) (cf. p. 19, 21, 22, 32, 33, 35).
- [Gib66] James Jerome GIBSON. « The senses considered as perceptual systems. » In : (1966) (cf. p. 34).
- [HKB85] Hermann HAKEN, JA Scott KELSO et Heinz BUNZ. « A theoretical model of phase transitions in human hand movements ». In : *Biological cybernetics* 51.5 (1985), p. 347-356 (cf. p. 105).
- [HSP89] CEJ HÄRTEL, KA SMITH et C PRINCE. « Defining aircrew coordination : Searching mishaps for meaning ». In : (1989). Publisher : Ohio State University (cf. p. 18).
- [Has+73] Klaus HASSELMANN, Tim P BARNETT, E BOUWS et al. « Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). » In : *Ergaenzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A* (1973) (cf. p. 130).
- [Hef03] Harry HEFT. « Affordances, Dynamic Experience, and the Challenge of Reification ». In : (2003), p. 32 (cf. p. 24).

- [Hef07] Harry HEFT. « The Social Constitution of Perceiver-Environment Reciprocity ». In : (2007), p. 22 (cf. p. 22).
- [Her10] B HERRY. *L'appontage dans la marine française : une approche opérationnelle*. Rapport Technique RT 1/16616 DAAP. Département aérodynamique appliquée : ONERA, juill. 2010 (cf. p. 18, 41, 51, 53-56, 94, 143).
- [Hew04] Paul G HEWITT. « Bernoulli's Principle ». In : *The Science Teacher* 71.7 (2004), p. 51 (cf. p. 42).
- [HHP08] A HOENCAMP, Th van HOLTEN et J V R PRASAD. « Relevant Aspects of Helicopter-Ship Operations ». In : (2008), p. 11 (cf. p. 53).
- [HCA12] Thomas E HORTON, Arpan CHAKRABORTY et Robert St AMANT. « Affordances for robots : a brief survey ». In : 2 (2012) (cf. p. 127).
- [Hue+09] Michaël HUET, David M. JACOBS, Cyril CAMACHON et al. « Self-Controlled Concurrent Feedback Facilitates the Learning of the Final Approach Phase in a Fixed-Base Flight Simulator ». In : *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 51.6 (déc. 2009), p. 858-871. ISSN : 0018-7208, 1547-8181. DOI : [10.1177/0018720809357343](https://doi.org/10.1177/0018720809357343). URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0018720809357343> (visité le 05/01/2023) (cf. p. 36, 134).
- [11] *Instrument Flying Handbook (FAA-H-8083-15A)*. Administration, United States Federal Aviation. 2011 (cf. p. 39, 47, 48).
- [Jen82] Richard S JENSEN. « Pilot judgment : Training and evaluation ». In : *Human factors* 24.1 (1982). Publisher : SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, p. 61-73 (cf. p. 18).
- [Joh80] Wayne JOHNSON. *A Comprehensive Analytical Model of Rotorcraft Aerodynamics and Dynamics. Part 3. Program Manual*. Rapp. tech. NATIONAL AERONAUTICS et SPACE ADMINISTRATION MOFFETT FIELD CA AMES RESEARCH ..., 1980 (cf. p. 104).
- [Jon18] Mari Riess JONES. *Time will tell : A theory of dynamic attending*. Oxford University Press, 2018 (cf. p. 130, 131).
- [JB89] Mari Riess JONES et Marilyn BOLTZ. « Dynamic Attending and Responses to Time ». In : (1989), p. 33 (cf. p. 130, 132, 133, 139).
- [KBM05] A. KHAN, C. BIL et K.E. MARION. « Ship motion prediction for launch and recovery of air vehicles ». In : *Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE*. 2005, 2795-2801 Vol. 3. DOI : [10.1109/OCEANS.2005.1640198](https://doi.org/10.1109/OCEANS.2005.1640198) (cf. p. 129).
- [KI07] Kyle KILBOURN et Jessica ISAKSSON. « Meaning through doing : The role of affordances over time ». In : *Sixth Nordcode Seminar & Workshop, Design Semiotics in Use. University of Art and Design Helsinki in Finland*. Citeseer. 2007 (cf. p. 72).

- [Kim+12] Sa Kil KIM, Sang Moon SUH, Gwi Sook JANG et al. « Empirical research on an ecological interface design for improving situation awareness of operators in an advanced control room ». In : *SI : CFD4NRS-3253* (1^{er} déc. 2012), p. 226-237. ISSN : 0029-5493. DOI : [10.1016/j.nucengdes.2012.08.026](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.08.026). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549312004578> (cf. p. 19).
- [KRS22] Brandon J. KING, Gemma J.M. READ et Paul M. SALMON. « Clear and present danger? Applying ecological interface design to develop an aviation risk management interface ». In : *Applied Ergonomics* 99 (1^{er} fév. 2022), p. 103643. ISSN : 0003-6870. DOI : [10.1016/j.apergo.2021.103643](https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103643). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687021002908> (cf. p. 19).
- [KA91] George J KLIR et W Ross ASHBY. « Requisite variety and its implications for the control of complex systems ». In : *Facets of systems science* (1991). Publisher : Springer, p. 405-417 (cf. p. 137).
- [Klo+11] Rolf E KLOMP, M. M. VAN PAASSEN, Max MULDER et al. « Air Traffic Control Interface for Creating 4D Inbound Trajectories ». In : (2011) (cf. p. 137).
- [Kru00] Steve KRUG. *Don't make me think! : a common sense approach to Web usability*. Pearson Education India, 2000 (cf. p. 140).
- [KK95] Masaaki KUROSU et Kaori KASHIMURA. « Apparent usability vs. inherent usability : experimental analysis on the determinants of the apparent usability ». In : *Conference companion on Human factors in computing systems*. 1995, p. 292-293 (cf. p. 140).
- [Lan+00] Judith H LANGLOIS, Lisa KALAKANIS, Adam J RUBENSTEIN et al. « Maxims or myths of beauty? A meta-analytic and theoretical review. » In : *Psychological bulletin* 126.3 (2000), p. 390 (cf. p. 140).
- [LJ99] Edward W. LARGE et Mari Riess JONES. « The dynamics of attending : How people track time-varying events. » In : *Psychological Review* 106.1 (jan. 1999), p. 119-159. ISSN : 1939-1471, 0033-295X. DOI : [10.1037/0033-295X.106.1.119](https://doi.org/10.1037/0033-295X.106.1.119). URL : <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0033-295X.106.1.119> (visité le 13/01/2023) (cf. p. 131).
- [Lau+08] Nathan LAU, Øystein VELAND, Jordanna KWOK et al. « Ecological Interface Design in the Nuclear Domain : An Application to the Secondary Subsystems of a Boiling Water Reactor Plant Simulator ». In : *IEEE Transactions on Nuclear Science* 55.6 (déc. 2008), p. 3579-3596. ISSN : 0018-9499. DOI : [10.1109/TNS.2008.2005979](https://doi.org/10.1109/TNS.2008.2005979). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/4723820/> (visité le 03/10/2022) (cf. p. 19).

- [LRR91] D. N. LEE, P. E. REDDISH et D. T. RAND. « Aerial docking by hummingbirds ». In : *Naturwissenschaften* 78.11 (nov. 1991), p. 526-527. ISSN : 0028-1042, 1432-1904. DOI : [10.1007/BF01131406](https://doi.org/10.1007/BF01131406). URL : <http://link.springer.com/10.1007/BF01131406> (visité le 05/01/2023) (cf. p. 125).
- [Lee76] David N LEE. « A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision ». In : *Perception* 5.4 (1976). Publisher : SAGE Publications Sage UK : London, England, p. 437-459 (cf. p. 135).
- [LYM84] David N LEE, David S YOUNG et Carmel M MCLAUGHLIN. « A roadside simulation of road crossing for children ». In : *Ergonomics* 27.12 (1984), p. 1271-1281 (cf. p. 23).
- [Lee80] Denis N LEE. « The optic flow field : The foundation of vision ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* 290.1038 (1980). Publisher : The Royal Society London, p. 169-179 (cf. p. 135).
- [Lee+13] A. M. P. de LEEGE, M. M. van PAASSEN, A. C. in't VELD et al. « Time–Space Diagram as Controller Support Tool for Closed-Path Continuous-Descent Operations ». In : *Journal of Aircraft* 50.5 (sept. 2013), p. 1394-1408. ISSN : 0021-8669, 1533-3868. DOI : [10.2514/1.C031899](https://doi.org/10.2514/1.C031899). URL : <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.C031899> (visité le 05/04/2023) (cf. p. 137).
- [LHB10] William LIDWELL, Kritina HOLDEN et Jill BUTLER. *Universal principles of design, revised and updated : 125 ways to enhance usability, influence perception, increase appeal, make better design decisions, and teach through design*. Rockport Pub, 2010 (cf. p. 140).
- [Lom87] Thomas J LOMBARDO. « The reciprocity of perceiver and environment : The evolution of James J ». In : *Gibson's ecological psychology* (1987). Publisher : Lawrence Erlbaum Associates (cf. p. 24).
- [LR09] Marion LUYAT et Tony REGIA-CORTE. « Les affordances : de James Jerome Gibson aux formalisations récentes du concept ». In : *L'Année psychologique* 109.2 (juin 2009). Number : 02, p. 297. ISSN : 0003-5033, 1955-2580. DOI : [10.4074/S000350330900205X](https://doi.org/10.4074/S000350330900205X). URL : <https://www.cairn.info/revue-l-annee-psychologique1-2009-2-page-297.htm> (visité le 06/06/2019) (cf. p. 21).
- [Mac77] William M MACE. « James J. Gibson's Strategy for Perceiving : Ask Not What's Inside Your Head, but What Your Head's Inside of. » In : *Hillsdale : NJ, Lawrence Erlbaum Associates* (1977) (cf. p. 20).
- [Mag09] Staffan MAGNUSSON NÄHLINDER. « Flight simulator training : Assessing the potential ». Thèse de doct. Linköping University Electronic Press, 2009 (cf. p. 18).

- [MHC12] Bruno MANTEL, Philippe HOPPENOT et Etienne COLLE. « Perceiving for Acting With Teleoperated Robots : Ecological Principles to Human–Robot Interaction Design ». In : *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A : Systems and Humans* 42.6 (nov. 2012), p. 1460-1475. ISSN : 1083-4427, 1558-2426. DOI : [10 . 1109 / TSMCA . 2012 . 2190400](https://doi.org/10.1109/TSMCA.2012.2190400). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/6185687/> (visité le 30/09/2022) (cf. p. 28, 134).
- [Man+15] Bruno MANTEL, Thomas A. STOFFREGEN, Alain CAMPBELL et al. « Exploratory Movement Generates Higher-Order Information That Is Sufficient for Accurate Perception of Scaled Egocentric Distance ». In : *PLOS ONE* 10.4 (9 avr. 2015). Sous la dir. de Suliann BEN HAMED, e0120025. ISSN : 1932-6203. DOI : [10 . 1371 / journal . pone . 0120025](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120025). URL : <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0120025> (visité le 13/06/2022) (cf. p. 35).
- [04] *Manuel de vol EC 225 LP*. Eurocopter. Décembre 2004 (cf. p. 46, 49).
- [Mar07] Leonard S MARK. « Perceiving the actions of other people ». In : *Ecological psychology* 19.2 (2007). Publisher : Taylor & Francis, p. 107-136 (cf. p. 23).
- [Mar87] Leonard S. MARK. « Eyeheight-scaled information about affordances : A study of sitting and stair climbing. » In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 13.3 (1987), p. 361-370. ISSN : 1939-1277, 0096-1523. DOI : [10 . 1037 / 0096 - 1523 . 13 . 3 . 361](https://doi.org/10.1037/0096-1523.13.3.361). URL : <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-1523.13.3.361> (visité le 04/04/2023) (cf. p. 23, 35).
- [Mar82] David MARR. *Vision : a computational investigation into the human representation and processing of visual information*. WH San Francisco. 1982 (cf. p. 20).
- [Mar+11] Bart J. A. van MARWIJK, Clark BORST, Mark MULDER et al. « Supporting 4D Trajectory Revisions on the Flight Deck : Design of a Human–Machine Interface ». In : *The International Journal of Aviation Psychology* 21.1 (6 jan. 2011), p. 35-61. ISSN : 1050-8414, 1532-7108. DOI : [10 . 1080 / 10508414 . 2011 . 537559](https://doi.org/10.1080/10508414.2011.537559). URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10508414.2011.537559> (visité le 18/11/2022) (cf. p. 126).
- [Mas+19] Hannah L MASONER, Joseph D CLARK, Catherine J DOWELL et al. « Posture Affects Affordance Perception of Reachability in Virtual Reality ». In : *Journal of Vision* 19.10 (6 sept. 2019), p. 220d. ISSN : 1534-7362. DOI : [10 . 1167 / 19 . 10 . 220d](https://doi.org/10.1167/19.10.220d). URL : <https://jov.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2750809> (visité le 29/09/2022) (cf. p. 23).
- [MS15] Rich C. MCILROY et Neville A. STANTON. « Ecological Interface Design Two Decades On : Whatever Happened to the SRK Taxonomy? » In : *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 45.2 (avr. 2015). Number : 2, p. 145-163. ISSN : 2168-2291, 2168-2305. DOI : [10 . 1109 / THMS . 2014 .](https://doi.org/10.1109/THMS.2014)

2369372. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7042788/> (visité le 08/09/2021) (cf. p. 19, 68).
- [MOW19] Wajih A. MEMON, Ieuan OWEN et Mark D. WHITE. « Motion Fidelity Requirements for Helicopter-Ship Operations in Maritime Rotorcraft Flight Simulators ». In : *Journal of Aircraft* 56.6 (nov. 2019). Number : 6, p. 2189-2209. ISSN : 1533-3868. DOI : [10.2514/1.C035521](https://doi.org/10.2514/1.C035521). URL : <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.C035521> (visité le 27/01/2022) (cf. p. 122).
- [Mic03] Claire F. MICHAELS. « Affordances : Four Points of Debate ». In : *Ecological Psychology* 15.2 (avr. 2003), p. 135-148. ISSN : 1040-7413, 1532-6969. DOI : [10.1207/S15326969EC01502_3](https://doi.org/10.1207/S15326969EC01502_3). URL : http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/S15326969EC01502_3 (visité le 09/04/2022) (cf. p. 23).
- [MP10] Claire F. MICHAELS et Zsolt PALATINUS. « A Ten Commandments for Ecological Psychology ». In : *The Routledge Handbook of Embodied Cognition*. Routledge, 19 juill. 2010. ISBN : 978-1-315-77584-5 978-1-317-68866-2 978-0-415-62361-2. DOI : [10.4324/9781315775845.ch2](https://doi.org/10.4324/9781315775845.ch2). URL : <https://www.taylorfrancis.com/books/9781315775845> (visité le 01/03/2023) (cf. p. 24, 34, 35).
- [MH98] Laura G. MILITELLO et Robert J. B. HUTTON. « Applied cognitive task analysis (ACTA) : a practitioner's toolkit for understanding cognitive task demands ». In : *Ergonomics* 41.11 (nov. 1998), p. 1618-1641. ISSN : 0014-0139, 1366-5847. DOI : [10.1080/001401398186108](https://doi.org/10.1080/001401398186108). URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/001401398186108> (visité le 20/04/2022) (cf. p. 41).
- [Mil+09] David MILLER, Erik KOCHER, Richard GRUGAN et al. « Complementary moving base and dynamic motion seat cueing for rotorcraft simulation ». In : *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*. 2009, p. 6249 (cf. p. 122).
- [MF18] Dev MINOTRA et Karen M FEIGH. « Studying Pilot Cognition in Ship-Based Helicopter Landing Maneuvers ». In : (2018), p. 13 (cf. p. 41, 55, 60, 61, 67, 69, 94, 143).
- [MF20] Dev MINOTRA et Karen M. FEIGH. « An Analysis of Cognitive Demands in Ship-Based Helicopter-Landing Maneuvers ». In : *Journal of the American Helicopter Society* 65.4 (1^{er} oct. 2020), p. 1-11. ISSN : 2161-6027. DOI : [10.4050/JAHS.65.042009](https://doi.org/10.4050/JAHS.65.042009). URL : <https://www.ingentaconnect.com/content/10.4050/JAHS.65.042009> (visité le 22/04/2022) (cf. p. 55).

- [Mor+21] Antoine HP MORICE, Thomas RAKOTOMAMONJY, Julien R SERRES et al. « Ecological design of augmentation improves helicopter ship landing maneuvers : An approach in augmented virtuality ». In : *PloS one* 16.8 (2021). Publisher : Public Library of Science San Francisco, CA USA, e0255779 (cf. p. 125).
- [Mul99] Max MULDER. « Cybernetics of tunnel-in-the-sky displays ». In : (1999) (cf. p. 143).
- [Mul16] Max MULDER. « Ecological flight deck design—The world behind the glass ». In : *Advances in aviation psychology*. Routledge, 2016, p. 131-148 (cf. p. 68, 127).
- [Naa+18] Peter NAAIJEN, Kees van OOSTEN, Karel ROOZEN et al. *Validation of a Deterministic Wave and Ship Motion Prediction System*. T. Volume 7B : Ocean Engineering. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. _eprint : <https://asmedigitalcollection.asme.org/OMAE/proceedings-pdf/OMAE2018/51272/V07BT06A032/2535815/v07bt06a032-omae2018-78037.pdf>. Juin 2018. DOI : [10.1115/OMAE2018-78037](https://doi.org/10.1115/OMAE2018-78037). URL : <https://doi.org/10.1115/OMAE2018-78037> (cf. p. 129).
- [Näh04] Staffan NÄHLINDER. *ACES-Air combat evaluation system*. Command et Control Systems, Swedish Defence Research Agency, 2004 (cf. p. 18).
- [NHM05] Neelam NAIKAR, Robyn HOPCROFT et Anna MOYLAN. « Work Domain Analysis : Theoretical Concepts and Methodology ». In : (2005), p. 108 (cf. p. 28, 30-32, 41, 56, 60, 67, 68).
- [Nai+01] Neelam NAIKAR, Gavan LINTERN, Penelope SANDERSON et al. *Cognitive Work Analysis for Air Defense Applications in Australia : (493752006-007)*. Type : dataset. American Psychological Association, 2001. DOI : [10.1037/e493752006-007](https://doi.org/10.1037/e493752006-007). URL : [http://doi.apa.org/get-pe- doi.cfm?doi=10.1037/e493752006-007](http://doi.apa.org/getpe- doi.cfm?doi=10.1037/e493752006-007) (visité le 10/10/2022) (cf. p. 30).
- [NMP06] Neelam NAIKAR, Anna MOYLAN et Brett PEARCE. « Analysing activity in complex systems with cognitive work analysis : concepts, guidelines and case study for control task analysis ». In : *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 7.4 (2006), p. 371-394 (cf. p. 69-71).
- [NMJ12] Felipe A.C. NASCIMENTO, Arnab MAJUMDAR et Steve JARVIS. « Nighttime approaches to offshore installations in Brazil : Safety shortcomings experienced by helicopter pilots ». In : *Accident Analysis & Prevention* 47 (juill. 2012), p. 64-74. ISSN : 00014575. DOI : [10.1016/j.aap.2012.01.014](https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.01.014). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0001457512000267> (visité le 07/01/2020) (cf. p. 39).
- [Nas14] Felipe Augusto Coutinho NASCIMENTO. « HAZARD IDENTIFICATION AND RISK ANALYSIS OF NIGHTTIME OFFSHORE HELICOPTER OPERATIONS ». In : (2014) (cf. p. 62).

- [Nei14] Ulric NEISSER. *Cognitive psychology : Classic edition*. Psychology press, 2014 (cf. p. 22).
- [Nev14] Timothy NEVILLE. « HELICOPTER MARINISATION ». In : (2014) (cf. p. 51-53).
- [NS+72] Allen NEWELL, Herbert Alexander SIMON et al. *Human problem solving*. T. 104. 9. Prentice-hall Englewood Cliffs, NJ, 1972 (cf. p. 41).
- [Nor13] Don NORMAN. *The design of everyday things : Revised and expanded edition*. Basic books, 2013 (cf. p. 140).
- [Nor03] Donald A NORMAN. « 1. ATTRACTIVE THINGS WORK BETTER ». In : (2003) (cf. p. 140).
- [Oud+96] Raoul R D OUDEJANS, Claire F MICHAELS, Frank C BAKKER et al. « The Relevance of Action in Perceiving Affordances : Perception of Catchableness of Fly Balls ». In : (1996), p. 13 (cf. p. 23).
- [Pad11] G. D. PADFIELD. « The tau of flight control ». In : *The Aeronautical Journal* 115.1171 (sept. 2011). Number : 1171, p. 521-556. ISSN : 0001-9240, 2059-6464. DOI : [10.1017/S0001924000006187](https://doi.org/10.1017/S0001924000006187). URL : https://www.cambridge.org/core/product/identifiser/S0001924000006187/type/journal_article (visité le 06/06/2019) (cf. p. 40, 125, 135).
- [PW03] G. D. PADFIELD et M. D. WHITE. « Flight simulation in academia *HELI-FLIGHT* in its first year of operation at the University of Liverpool ». In : *The Aeronautical Journal* 107.1075 (sept. 2003), p. 529-538. ISSN : 0001-9240, 2059-6464. DOI : [10.1017/S0001924000013415](https://doi.org/10.1017/S0001924000013415). URL : https://www.cambridge.org/core/product/identifiser/S0001924000013415/type/journal_article (visité le 03/04/2023) (cf. p. 104, 125, 134).
- [Pad08] Gareth D PADFIELD. *Helicopter flight dynamics : the theory and application of flying qualities and simulation modelling*. John Wiley & Sons, 2008 (cf. p. 39, 40, 42, 44, 45, 50, 55).
- [PLB03] Gareth D. PADFIELD, David N. LEE et Roy BRADLEY. « How Do Helicopter Pilots Know When to Stop, Turn or Pull Up? (Developing Guidelines for Vision Aids) ». In : *Journal of the American Helicopter Society* 48.2 (2003). Number : 2, p. 108. ISSN : 00028711. DOI : [10.4050/JAHS.48.108](https://doi.org/10.4050/JAHS.48.108). URL : <http://www.ingentaconnect.com/content/ahs/jahs/2003/00000048/00000002/art00005> (visité le 06/06/2019) (cf. p. 19, 124).
- [PFT93] Christopher C PAGANO, Paula FITZPATRICK et MT TURVEY. « Tensorial basis to the constancy of perceived object extent over variations of dynamic touch ». In : *Perception & Psychophysics* 54 (1993), p. 43-54 (cf. p. 36).
- [PHM77] Russell V PARRISH, Jacob A HOUCK et Dennis J MARTIN JR. *Empirical comparison of a fixed-base and a moving-base simulation of a helicopter engaged in visually conducted slalom runs*. Rapp. tech. 1977 (cf. p. 122).

- [PKC04] Jodie M PLUMERT, Joseph K KEARNEY et James F CREMER. « Children's perception of gap affordances : bicycling across traffic-filled intersections in an immersive virtual environment ». In : *Child development* 75.4 (2004), p. 1243-1253 (cf. p. 23).
- [Pos19] Dees POSTMA. « Affordance-based control in running to catch fly balls ». ISBN : 978-94-034-1907-7. Thèse de doct. University of Groningen, 2019. DOI : [10.33612/diss.96274751](https://doi.org/10.33612/diss.96274751) (cf. p. 23).
- [PZ17] Dees POSTMA et Frank ZAAL. « Towards Affordance-Based Control in Catching Fly Balls : The Affordance of Catchability ». In : *Journal of Vision* 17.10 (2017). Publisher : The Association for Research in Vision and Ophthalmology, p. 235-235 (cf. p. 23).
- [PLZ18] Dees BW POSTMA, Koen APM LEMMINK et Frank TJM ZAAL. « The affordance of catchability in running to intercept fly balls. » In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 44.9 (2018), p. 1336 (cf. p. 24).
- [Pri+16] James A PRITCHARD, Ryan D WALLACE, John K TRITSCHLER et al. « Characterization of Pilot Strategy for Simulated Shipboard Approaches with Realistic Ship Motion ». In : (2016), p. 17 (cf. p. 143).
- [Pro95] Raymond W PROUTY. *Helicopter performance, stability, and control*. 1995 (cf. p. 49, 50).
- [Ram+08a] Verónica RAMENZONI, Michael A RILEY, Tehran DAVIS et al. « Tuning in to another person's action capabilities : perceiving maximal jumping-reach height from walking kinematics. » In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 34.4 (2008). Publisher : American Psychological Association, p. 919 (cf. p. 23).
- [Ram+08b] Verónica C RAMENZONI, Michael A RILEY, Kevin SHOCKLEY et al. « An information-based approach to action understanding ». In : *Cognition* 106.2 (2008). Publisher : Elsevier, p. 1059-1070 (cf. p. 23).
- [Ram+08c] Verónica C RAMENZONI, Michael A RILEY, Kevin SHOCKLEY et al. « Short article : Carrying the height of the world on your ankles : Encumbering observers reduces estimates of how high an actor can jump ». In : *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 61.10 (2008). Publisher : SAGE Publications Sage UK : London, England, p. 1487-1495 (cf. p. 23).
- [Ram+10] Verónica C. RAMENZONI, Tehran J. DAVIS, Michael A. RILEY et al. « Perceiving action boundaries : Learning effects in perceiving maximum jumping-reach affordances ». In : *Attention, Perception, & Psychophysics* 72.4 (mai 2010), p. 1110-1119. ISSN : 1943-3921, 1943-393X. DOI : [10.3758/APP.72.4.1110](https://doi.org/10.3758/APP.72.4.1110). URL : <http://link.springer.com/10.3758/APP.72.4.1110> (visité le 27/02/2023) (cf. p. 23).

- [Ran+13] Amy RANKIN, Rogier WOLTJER, Joris FIELD et al. « “Staying ahead of the aircraft” and Managing Surprise in Modern Airlines ». In : *5th Resilience Engineering Symposium : Managing trade-offs, 25-27 June 2013, Soesterberg, The Netherlands*. 2013 (cf. p. 67).
- [Ras83] Jens RASMUSSEN. « Skills, rules, and knowledge ; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models ». In : *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics* 3 (1983), p. 257-266 (cf. p. 19).
- [Ras85] Jens RASMUSSEN. « The role of hierarchical knowledge representation in decisionmaking and system management ». In : *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics* 2 (1985), p. 234-243 (cf. p. 19, 28, 56).
- [RPG94] Jens RASMUSSEN, Annelise Mark PEJTERSEN et Len P GOODSTEIN. « Cognitive systems engineering ». In : (1994) (cf. p. 31, 69, 71).
- [Ree82] Edward S REED. « Descartes’ corporeal ideas hypothesis and the origin of scientific psychology ». In : *The Review of Metaphysics* (1982), p. 731-752 (cf. p. 25).
- [Ree88] Edward S REED. *James J. Gibson and the psychology of perception*. Yale University Press, 1988 (cf. p. 25).
- [Ree96] Edward S REED. *Encountering the world : Toward an ecological psychology*. Oxford University Press, 1996 (cf. p. 25).
- [Ren+22] Erwan RENAUDO, Philipp ZECH, Raja CHATILA et al. « Editorial : Computational models of affordance for robotics ». In : *Frontiers in Neurorobotics* 16 (6 oct. 2022), p. 1045355. ISSN : 1662-5218. DOI : [10.3389/fnbot.2022.1045355](https://doi.org/10.3389/fnbot.2022.1045355). URL : <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnbot.2022.1045355/full> (visité le 30/03/2023) (cf. p. 127).
- [Rev+19] Kirsten REVELL, Pat LANGDON, Mike BRADLEY et al. « UCEID - The Best of Both Worlds : Combining Ecological Interface Design with User Centered Design in a Novel HF Method Applied to Automated Driving ». In : *Advances in Human Aspects of Transportation*. Sous la dir. de Neville STANTON. T. 786. Cham : Springer International Publishing, 2019, p. 493-501. ISBN : 978-3-319-93884-4 978-3-319-93885-1. DOI : [10.1007/978-3-319-93885-1_44](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93885-1_44). URL : http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-93885-1_44 (visité le 06/06/2019) (cf. p. 140).
- [RP84] Gilbert L RICARD et Russell V PARRISH. « Pilot differences and motion cuing effects on simulated helicopter hover ». In : *Human Factors* 26.3 (1984), p. 249-256 (cf. p. 122).

- [RL16] Dale RICHARDS et Phillip LAMB. « Functional Symbology - Evaluation of task-specific Head-Up Display information for use on a commercial flight deck ». In : *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. Washington, D.C. : American Institute of Aeronautics et Astronautics, 13 juin 2016. ISBN : 978-1-62410-429-9. DOI : [10.2514/6.2016-3374](https://doi.org/10.2514/6.2016-3374). URL : <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2016-3374> (visité le 06/06/2019) (cf. p. 139).
- [Rie+19] Christopher RIEHM, Anthony CHERO, Paula L. SILVA et al. « Virtual auditory aperture passability ». In : *Experimental Brain Research* 237.1 (jan. 2019), p. 191-200. ISSN : 0014-4819, 1432-1106. DOI : [10.1007/s00221-018-5407-z](https://doi.org/10.1007/s00221-018-5407-z). URL : <http://link.springer.com/10.1007/s00221-018-5407-z> (visité le 29/09/2022) (cf. p. 23).
- [RF20] Grace ROESSLING et Brett FAJEN. « Hybrid versus unified accounts of affordance perception and on-line control during locomotor interception ». In : *Journal of Vision* 20.11 (2020). Publisher : The Association for Research in Vision and Ophthalmology, p. 1299-1299 (cf. p. 23).
- [RW02] Michael ROSCOE et Colin WILKINSON. « DIMSS-JSHIP's M&S Process for Ship/Helicopter Testing & Training ». In : *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*. 2002, p. 4597 (cf. p. 91).
- [Rou+14] Frédéric L ROUBIEU, Julien R SERRES, Fabien COLONNIER et al. « A biomimetic vision-based hovercraft accounts for bees' complex behaviour in various corridors ». In : *Bioinspiration & biomimetics* 9.3 (2014). Publisher : IOP Publishing, p. 036003 (cf. p. 125).
- [RTO03] RTO. *Helicopter/ship qualification testing - Les essais de qualification hélicoptère/navire*. en. [Elektronische Ressource]. T. 22. OCLC : 249579936. Neuilly-sur-Seine : NATO, 2003. ISBN : 978-92-837-1093-6 (cf. p. 51).
- [RF05] Franck RUFFIER et Nicolas FRANCESCHINI. « Optic flow regulation : the key to aircraft automatic guidance ». In : *Biomimetic Robotics* 50.4 (31 mars 2005), p. 177-194. ISSN : 0921-8890. DOI : [10.1016/j.robot.2004.09.016](https://doi.org/10.1016/j.robot.2004.09.016). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889004001733> (cf. p. 125).
- [RF15] Franck RUFFIER et Nicolas FRANCESCHINI. « Optic Flow Regulation in Unsteady Environments : A Tethered MAV Achieves Terrain Following and Targeted Landing Over a Moving Platform ». In : *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 79.2 (août 2015). Number : 2, p. 275-293. ISSN : 0921-0296, 1573-0409. DOI : [10.1007/s10846-014-0062-5](https://doi.org/10.1007/s10846-014-0062-5). URL : <http://link.springer.com/10.1007/s10846-014-0062-5> (visité le 06/06/2019) (cf. p. 125).

- [Run77] Sverker RUNESON. « On the possibility of "smart" perceptual mechanisms ». In : *Scandinavian Journal of Psychology* 18.1 (sept. 1977), p. 172-179. ISSN : 0036-5564, 1467-9450. DOI : [10.1111/j.1467-9450.1977.tb00274.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-9450.1977.tb00274.x). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-9450.1977.tb00274.x> (visité le 27/02/2023) (cf. p. 34, 35).
- [SK87] Elliot SALTZMAN et JA KELSO. « Skilled actions : a task-dynamic approach. » In : *Psychological review* 94.1 (1987). Publisher : American Psychological Association, p. 84 (cf. p. 133).
- [Sat+16] Eduardo Navarra SATUF, Eugenius KASZKUREWICZ, Roberto SCHIRRU et al. « Situation awareness measurement of an ecological interface designed to operator support during alarm floods ». In : *International Journal of Industrial Ergonomics* 53 (1^{er} mai 2016), p. 179-192. ISSN : 0169-8141. DOI : [10.1016/j.ergon.2016.01.002](https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.01.002). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169814116300026> (cf. p. 19).
- [SV20] F SCHEWE et M. VOLLRATH. « Ecological interface design effectively reduces cognitive workload – The example of HMIs for speed control ». In : *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour* 72 (2020), p. 155-170. ISSN : 1369-8478. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.trf.2020.05.009>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136984782030423X> (cf. p. 19).
- [Sch+98] RC SCHMIDT, Michelle BIENVENU, PA FITZPATRICK et al. « A comparison of intra-and interpersonal interlimb coordination : coordination breakdowns and coupling strength. » In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 24.3 (1998), p. 884 (cf. p. 105).
- [Ser+23] Julien R SERRES, Mathieu THOMAS, Aimie BERGER DAUXÈRE et al. « Are biological agents governed by similar visuo-motor mechanisms to fly? » International Conference on Perception and Action (ICPA), Guadalajara. 2023. URL : <https://icpa2023.com/> (cf. p. 3).
- [SR17] Julien R. SERRES et Franck RUFFIER. « Optic flow-based collision-free strategies : From insects to robots ». In : *From Insects to Robots* 46.5 (1^{er} sept. 2017), p. 703-717. ISSN : 1467-8039. DOI : [10.1016/j.asd.2017.06.003](https://doi.org/10.1016/j.asd.2017.06.003). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S146780391730066X> (cf. p. 125).
- [Sha82] Robert SHAW. « Ecological psychology : The consequence of a commitment to realism ». In : *Cognition and the symbolic processes* (1982) (cf. p. 33).
- [Sim08] Herbert Alexander SIMON. *The sciences of the artificial*. 3. ed., [Nachdr.] Cambridge, Mass. : MIT Press, 2008. 231 p. ISBN : 978-0-262-19374-0 978-0-262-69191-8 (cf. p. 21, 25-27).

- [SH95] Kip SMITH et P.A. HANCOCK. « Situation Awareness Is Adaptive, Externally Directed Consciousness ». In : *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 37.1 (mars 1995), p. 137-148. ISSN : 0018-7208, 1547-8181. DOI : [10.1518/001872095779049444](https://doi.org/10.1518/001872095779049444). URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1518/001872095779049444> (visité le 20/02/2023) (cf. p. 18).
- [Sne95] Ian Naismith SNEDDON. *Fourier transforms*. Courier Corporation, 1995 (cf. p. 138).
- [Sno07] David SNOWDEN. « Applied Research Associates, Inc. gary@decisionmaking.com ». en. In : (2007) (cf. p. 67).
- [ST88] H Yosef SOLOMON et Michael T TURVEY. « Haptically perceiving the distances reachable with hand-held objects. » In : *Journal of experimental psychology : Human perception and performance* 14.3 (1988), p. 404 (cf. p. 73).
- [SCP01] N.A STANTON, P.R.G CHAMBERS et J PIGGOTT. « Situational awareness and safety ». In : *Safety Science* 39.3 (déc. 2001), p. 189-204. ISSN : 09257535. DOI : [10.1016/S0925-7535\(01\)00010-8](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(01)00010-8). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925753501000108> (visité le 20/02/2023) (cf. p. 40).
- [Sta+16a] Neville A STANTON, Katherine L PLANT, Aaron P ROBERTS et al. « Extending helicopter operations to meet future integrated transportation needs ». In : *Applied ergonomics* 53 (2016), p. 364-373 (cf. p. 60).
- [Sta+16b] Neville A. STANTON, Katherine L. PLANT, Aaron P. ROBERTS et al. « Extending helicopter operations to meet future integrated transportation needs ». In : *Applied Ergonomics* 53 (2016), p. 364-373. ISSN : 0003-6870. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.07.001>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687015300302> (cf. p. 19).
- [Ste+20] Scott T. STEINMETZ, Oliver W. LAYTON, Nathaniel V. POWELL et al. « Affordance-based versus current-future accounts of choosing whether to pursue or abandon the chase of a moving target ». In : *Journal of Vision* 20.3 (31 mars 2020). Number : 3, p. 8. ISSN : 1534-7362. DOI : [10.1167/jov.20.3.8](https://doi.org/10.1167/jov.20.3.8). URL : <https://jov.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2764056> (visité le 08/09/2020) (cf. p. 33, 72, 123).
- [Ste22] Robert F STENGEL. *Flight dynamics*. Princeton University Press, 2022 (cf. p. 39, 45).
- [Sto03] Thomas A STOFFREGEN. « Affordances as Properties of the Animal–Environment System ». In : (2003), p. 21 (cf. p. 24, 25, 27).

- [Sto+03] Thomas A STOFFREGEN, Benoit G BARDY, LJ SMART et al. « On the nature and evaluation of fidelity in virtual environments ». In : *Virtual and adaptive environments : Applications, implications, and human performance issues* (2003), p. 111-128 (cf. p. 123).
- [SB01] Thomas A. STOFFREGEN et Benoît G. BARDY. « On specification and the senses ». In : *Behavioral and Brain Sciences* 24.2 (avr. 2001). Number : 2, p. 195-213. ISSN : 0140-525X, 1469-1825. DOI : [10.1017/S0140525X01003946](https://doi.org/10.1017/S0140525X01003946). URL : https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0140525X01003946/type/journal_article (visité le 12/11/2021) (cf. p. 33).
- [Sto+99] Thomas A. STOFFREGEN, Kathleen M. GORDAY, Yang-Yi SHENG et al. « Perceiving affordances for another person's actions. » In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 25.1 (1999), p. 120-136. ISSN : 1939-1277, 0096-1523. DOI : [10.1037/0096-1523.25.1.120](https://doi.org/10.1037/0096-1523.25.1.120). URL : <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-1523.25.1.120> (visité le 27/02/2023) (cf. p. 23).
- [SM15] Thomas A. STOFFREGEN et Bruno MANTEL. « Exploratory movement and affordances in design ». In : *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 29.3 (août 2015), p. 257-265. ISSN : 0890-0604, 1469-1760. DOI : [10.1017/S0890060415000190](https://doi.org/10.1017/S0890060415000190). URL : https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0890060415000190/type/journal_article (visité le 27/03/2023) (cf. p. 24, 36).
- [SMB17] Thomas A. STOFFREGEN, Bruno MANTEL et Benoît G. BARDY. « The Senses Considered as One Perceptual System ». In : *Ecological Psychology* 29.3 (3 juill. 2017). Number : 3, p. 165-197. ISSN : 1040-7413, 1532-6969. DOI : [10.1080/10407413.2017.1331116](https://doi.org/10.1080/10407413.2017.1331116). URL : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10407413.2017.1331116> (visité le 06/06/2019) (cf. p. 33-35).
- [Tan+22] TANJA MARTINI, PHILLIPP MEVENKAMP, NIKLAS PEINECKE et al. « Investigation and evaluation of a helicopter pilot assistance system for off-shore missions in degraded visual environment ». In : Proc.SPIE. T. 12125. 31 mai 2022, p. 1212507. DOI : [10.1117/12.2618786](https://doi.org/10.1117/12.2618786). URL : <https://doi.org/10.1117/12.2618786> (cf. p. 143).
- [Ten+14] Sanne TEN OEVER, Charles E SCHROEDER, David POEPEL et al. « Rhythmicity and cross-modal temporal cues facilitate detection ». In : *Neuropsychologia* 63 (2014). Publisher : Elsevier, p. 43-50 (cf. p. 133).
- [Tho+21a] Mathieu THOMAS, José M. Pereira FIGUEIRA, Julien R. SERRES et al. « Helicopter Pilots Synchronize Their Altitude with Ship Heave to Minimize Energy When Landing on a Ship's Deck ». In : *The International Journal of Aerospace Psychology* 31.2 (2021). Publisher : Routledge _eprint : <https://doi.org/10.1080/24721840.2020.1862659>, p. 135-148. DOI : [10.](https://doi.org/10.1080/24721840.2020.1862659)

- 1080/24721840.2020.1862659. URL : <https://doi.org/10.1080/24721840.2020.1862659> (cf. p. 3, 73).
- [Tho+19] Mathieu THOMAS, Julien R SERRES, Thomas RAKOTOMAMONJY et al. « On the functional nature of perceptual-motor coupling during ship deck landing maneuvers. » Journées FIG.RV, Marseille. 2019. URL : <https://jfigrv2019.sciencesconf.org/index.html> (cf. p. 3).
- [Tho+21b] Mathieu THOMAS, Julien R SERRES, Thomas RAKOTOMAMONJY et al. « Benefits of ecologically designed visual interfaces for the perception of deck landing opportunities with helicopter. » Journées GTRV, Online. 2021. URL : <https://www.afxr.org/articles/69163-journee-gtrv-realites-virtuelles-19-mars-2021> (cf. p. 3).
- [Tho+23] Mathieu THOMAS, Julien R SERRES, Thomas RAKOTOMAMONJY et al. « Visual augmentation of deck-landing-ability improves helicopter ship landing decisions ». In : *Scientific Reports* 13.1 (2023), p. 5119 (cf. p. 3, 106).
- [Tra97] Noam TRACTINSKY. « Aesthetics and apparent usability : empirically assessing cultural and methodological issues ». In : *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems*. 1997, p. 115-122 (cf. p. 140).
- [TKI00] Noam TRACTINSKY, Adi S KATZ et Dror IKAR. « What is beautiful is usable ». In : *Interacting with computers* 13.2 (2000), p. 127-145 (cf. p. 140).
- [TC95] M.T. TURVEY et Claudia CARELLO. « Chapter 11 - Dynamic Touch ». In : *Perception of Space and Motion*. Sous la dir. de William EPSTEIN et Sheena ROGERS. Handbook of Perception and Cognition. San Diego : Academic Press, 1995, p. 401-490. ISBN : 978-0-12-240530-3. DOI : <https://doi.org/10.1016/B978-012240530-3/50013-4>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780122405303500134> (cf. p. 73).
- [TS99] MT TURVEY et Robert E SHAW. « Ecological foundations of cognition. I : Symmetry and specificity of animal-environment systems ». In : *Journal of Consciousness Studies* 6.11 (1999). Publisher : Imprint Academic, p. 95-110 (cf. p. 22, 34).
- [Tuš+20] Martin TUŠL, Giuseppe RAINIERI, Federico FRABONI et al. « Helicopter Pilots' Tasks, Subjective Workload, and the Role of External Visual Cues During Shipboard Landing ». In : *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making* 14.3 (sept. 2020). Number : 3, p. 242-257. ISSN : 1555-3434. DOI : [10.1177/1555343420948720](https://doi.org/10.1177/1555343420948720). URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1555343420948720> (visité le 19/01/2022) (cf. p. 41, 55, 62, 69, 143).

- [VCP95] K.J. VICENTE, K. CHRISTOFFERSEN et A. PEREKLITA. « Supporting operator problem solving through ecological interface design ». In : *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 25.4 (avr. 1995), p. 529-545. ISSN : 00189472. DOI : [10.1109/21.370186](https://doi.org/10.1109/21.370186). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/370186/> (visité le 29/03/2022) (cf. p. 19, 30).
- [VR92] K.J. VICENTE et J. RASMUSSEN. « Ecological interface design : theoretical foundations ». In : *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 22.4 (août 1992). Number : 4, p. 589-606. ISSN : 00189472. DOI : [10.1109/21.156574](https://doi.org/10.1109/21.156574). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/156574/> (visité le 07/10/2021) (cf. p. 19, 27-29, 31, 68, 126, 127).
- [Vic99] Kim J VICENTE. *Cognitive work analysis : Toward safe, productive, and healthy computer-based work*. CRC press, 1999 (cf. p. 69-71).
- [VR88] Kim J VICENTE et Jens RASMUSSEN. « On applying the skills, rules, knowledge framework to interface design ». In : *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*. T. 32. Issue : 5. SAGE, 1988, p. 254-258 (cf. p. 68, 137).
- [VR90] Kim J VICENTE et Jens RASMUSSEN. « The Ecology of Human-Machine Systems 11 : Mediating "Direct Perception" in Complex Work Domains ». In : (1990), p. 43 (cf. p. 19, 28-30, 68, 137, 139).
- [Vic96] Kim J. VICENTE. « Improving dynamic decision making in complex systems through ecological interface design : A research overview ». In : *System Dynamics Review* 12.4 (1996), p. 251-279. ISSN : 08837066, 10991727. DOI : [10.1002/\(SICI\)1099-1727\(199624\)12:4<251::AID-SDR108>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199624)12:4<251::AID-SDR108>3.0.CO;2-S). URL : [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/\(SICI\)1099-1727\(199624\)12:4%3C251::AID-SDR108%3E3.0.CO;2-S](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/(SICI)1099-1727(199624)12:4%3C251::AID-SDR108%3E3.0.CO;2-S) (visité le 29/03/2022) (cf. p. 19, 21, 126).
- [Vos+10] M. VOSKUIJL, G. D. PADFIELD, D. J. WALKER et al. « Simulation of automatic helicopter deck landings using nature inspired flight control ». In : *The Aeronautical Journal* 114.1151 (jan. 2010). Number : 1151, p. 25-34. ISSN : 0001-9240, 2059-6464. DOI : [10.1017/S000192400000350X](https://doi.org/10.1017/S000192400000350X). URL : https://www.cambridge.org/core/product/identifler/S000192400000350X/type/journal_article (visité le 06/06/2019) (cf. p. 125).
- [WM09] Jeffrey B WAGMAN et Eric A MALEK. « Geometric, kinetic-kinematic, and intentional constraints influence willingness to pass under a barrier ». In : *Experimental Psychology* 56.6 (2009), p. 409-417 (cf. p. 123).
- [WS20] Jeffrey B. WAGMAN et Thomas A. STOFFREGEN. « It doesn't add up : Nested affordances for reaching are perceived as a complex particular ». In : *Attention, Perception, & Psychophysics* 82.8 (nov. 2020), p. 3832-3841. ISSN : 1943-3921, 1943-393X. DOI : [10.3758/s13414-020-02108-w](https://doi.org/10.3758/s13414-020-02108-w).

- URL : <https://link.springer.com/10.3758/s13414-020-02108-w> (visité le 04/05/2022) (cf. p. 23, 27).
- [WM21] Christian WALKO et Malte-Jörn MAIBACH. « Flying a helicopter with the HoloLens as head-mounted display ». In : *Optical Engineering* 60.10 (21 oct. 2021). ISSN : 0091-3286. DOI : 10.1117/1.OE.60.10.103103. URL : <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/optical-engineering/volume-60/issue-10/103103/Flying-a-helicopter-with-the-HoloLens-as-head-mounted-display/10.1117/1.OE.60.10.103103.full> (visité le 24/02/2022) (cf. p. 19).
- [Wan+13] Yaxing WANG, Mark WHITE, Ieuan OWEN et al. « Effects of visual and motion cues in flight simulation of ship-borne helicopter operations ». In : *CEAS Aeronautical Journal* 4.4 (déc. 2013). Number : 4, p. 385-396. ISSN : 1869-5582, 1869-5590. DOI : 10.1007/s13272-013-0085-9. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s13272-013-0085-9> (visité le 04/07/2019) (cf. p. 122, 134).
- [War88a] R WARREN. « Visual perception in high-speed low-altitude flight ». In : *Aviation, space, and environmental medicine* 59 (1^{er} déc. 1988), A116-24 (cf. p. 135).
- [War82] Rik WARREN. « OPTICAL TRANSFORMATION DURING MOVEMENT : REVIEW OF THE OPTICAL CONCOMITANTS OF EGOMOTION ». In : (1982) (cf. p. 135, 136).
- [War84] William H WARREN. « Perceiving Affordances : Visual Guidance of Stair Climbing ». In : (1984), p. 21 (cf. p. 23).
- [War88b] William H. WARREN. « Chapter 14 Action Modes and Laws of Control for the Visual Guidance Of Action ». In : *Advances in Psychology*. Sous la dir. d'Onno G. MEIJER et Klaus ROTH. T. 50. North-Holland, 1^{er} jan. 1988, p. 339-379. ISBN : 0166-4115. DOI : 10.1016/S0166-4115(08)62564-9. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166411508625649> (cf. p. 125, 136).
- [War06] William H. WARREN. « The dynamics of perception and action. » In : *Psychological Review* 113.2 (2006). Number : 2, p. 358-389. ISSN : 1939-1471, 0033-295X. DOI : 10.1037/0033-295X.113.2.358. URL : <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0033-295X.113.2.358> (visité le 04/07/2019) (cf. p. 22, 72, 105).
- [WW87] William H. WARREN et Suzanne WHANG. « Visual guidance of walking through apertures : Body-scaled information for affordances. » In : *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance* 13.3 (1987), p. 371-383. ISSN : 1939-1277, 0096-1523. DOI : 10.1037/0096-1523.13.3.371. URL : <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/0096-1523.13.3.371> (visité le 29/09/2022) (cf. p. 23).

- [WP18] Rebecca AT WEAST et Dennis R PROFFITT. « Can I reach that? Blind reaching as an accurate measure of estimated reachable distance ». In : *Consciousness and cognition* 64 (2018). Publisher : Elsevier, p. 121-134 (cf. p. 23).
- [Weh03] R WEHNER. « Desert ant navigation : how miniature brains solve complex tasks ». In : (2003), p. 10 (cf. p. 26).
- [WM05] Rob WITHAGEN et Claire F. MICHAELS. « On Ecological Conceptualizations of Perceptual Systems and Action Systems ». In : *Theory & Psychology* 15.5 (oct. 2005), p. 603-620. ISSN : 0959-3543, 1461-7447. DOI : [10.1177/0959354305057265](https://doi.org/10.1177/0959354305057265). URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0959354305057265> (visité le 22/03/2023) (cf. p. 35).
- [WH06] David D WOODS et Erik HOLLNAGEL. *Joint cognitive systems : Patterns in cognitive systems engineering*. CRC Press, 2006 (cf. p. 126).
- [Yan+08] Xilin YANG, Hemanshu POTA, Matt GARRATT et al. « Ship Motion Prediction for Maritime Flight Operations ». In : *IFAC Proceedings Volumes* 41.2 (2008), p. 12407-12412. ISSN : 1474-6670. DOI : <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.02100>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016409663> (cf. p. 129).
- [Yua+21] Peijun YUAN, Ruichen HU, Xue ZHANG et al. « Cortical entrainment to hierarchical contextual rhythms recomposes dynamic attending in visual perception ». In : *eLife* 10 (4 juin 2021). Sous la dir. d'Huan LUO et Floris P de LANGE. Publisher : eLife Sciences Publications, Ltd, e65118. ISSN : 2050-084X. DOI : [10.7554/eLife.65118](https://doi.org/10.7554/eLife.65118). URL : <https://doi.org/10.7554/eLife.65118> (cf. p. 133).
- [ZRK15] K.D.S. ZEILSTRA, A.J.C. de REUS et J KONING. *Improving offshore helicopter operability & safety*. NLR-TP-2014-518. Amsterdam, The Netherlands : National Aerospace Laboratory NLR, 2015 (cf. p. 143, 144).
- [ZZL21] Tao ZHANG, Xiao-Qing ZHENG et Ming-Xin LIU. « Multiscale attention-based LSTM for ship motion prediction ». In : *Ocean Engineering* 230 (2021), p. 109066. ISSN : 0029-8018. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109066>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801821005011> (cf. p. 129).
- [Z XK04] X. ZHAO, R. XU et C. KWAN. « Ship-motion prediction : algorithms and simulation results ». In : *2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. T. 5. Montreal, Que., Canada : IEEE, 2004, p. V-125-8. ISBN : 978-0-7803-8484-2. DOI : [10.1109/ICASSP.2004.1327063](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2004.1327063). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/1327063/> (visité le 07/11/2019) (cf. p. 129).

- [Zie+10] Stéphane ZIEBA, Philippe POLET, Frédéric VANDERHAEGEN et al. « Principles of adjustable autonomy : a framework for resilient human-machine cooperation ». In : *Cognition, Technology & Work* 12.3 (2010), p. 193-203 (cf. p. 127).

ANNEXES

Bibliographie

A. Supplemental data de la 1^{ère} expérience

Pilot D, Sea State 4. ID 220

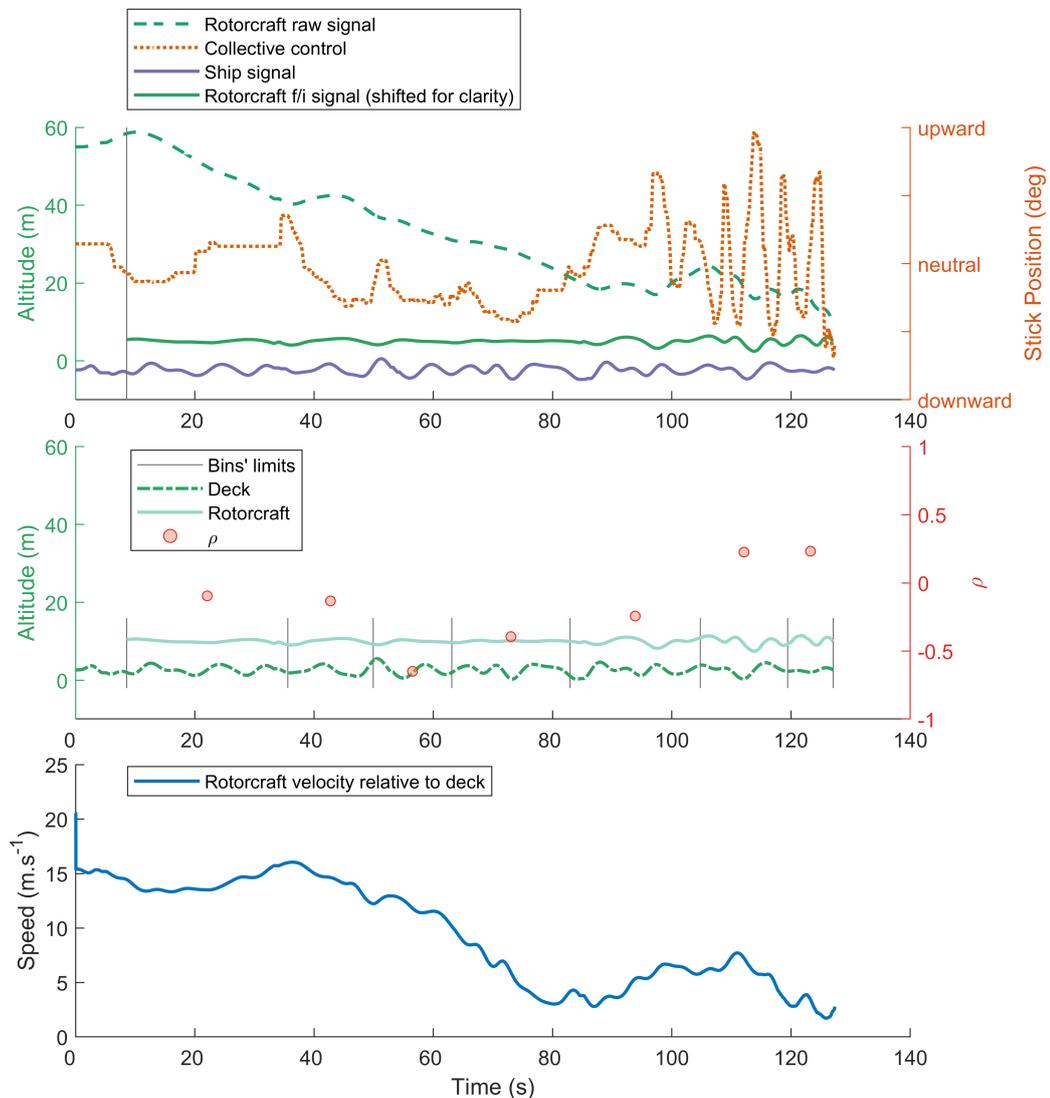


FIGURE 1. – Méthode de traitement des données analysée à la 1^{ère} expérience représentée sur un cas représentatif de trajectoire de vol. En haut, traitement (filtrage et interpolation) des positions de l'hélicoptère (*Rotorcraft raw signal*) et activité sur la commande de pas collectif (*Collective control*) augmentant vers la fin de l'appontage (phase de stationnaire et poser). Graphique du milieu, Calcul des coefficients de corrélation ρ entre le signal filtré et interpolé de l'hélicoptère (*rotorcraft*) et les positions du pont d'envol du navire (*deck*) dans chacun des segments de distance au pont (*bin's limit*) calculés sur la base de la vitesse de l'hélicoptère relative au pont (*Rotorcraft velocity relative to the deck*) présentée sur le graphique du bas.