



HAL
open science

Conception d'une représentation graphique des gestes numériques pour le cockpit tactile fondée sur les dimensions participant à la conscience mutuelle entre les pilotes

Valentin Becquet

► To cite this version:

Valentin Becquet. Conception d'une représentation graphique des gestes numériques pour le cockpit tactile fondée sur les dimensions participant à la conscience mutuelle entre les pilotes. Interface homme-machine [cs.HC]. Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, 2019. Français. NNT : . tel-02492163

HAL Id: tel-02492163

<https://hal.science/tel-02492163v1>

Submitted on 26 Feb 2020

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.



THÈSE

**En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE**
Délivré par l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace

**Présentée et soutenue par
Valentin BECQUET**

Le 16 décembre 2019

**Conception d'une représentation graphique des gestes
numériques pour le cockpit tactile fondée sur les dimensions
participant à la conscience mutuelle entre les pilotes**

Ecole doctorale : **AA - Aéronautique, Astronautique**

Spécialité : **Informatique**

Unité de recherche :
Laboratoire de Recherche ENAC

Thèse dirigée par
Catherine LETONDAL et Xavier GUCHET

Jury

M. Franck POIRIER, Rapporteur
M. Pascal SALEMBIER, Rapporteur
M. Aurélien TABARD, Examineur
M. Emmanuel GARDINETTI, Examineur
Mme Catherine LETONDAL, Directrice de thèse
M. Xavier GUCHET, Co-directeur de thèse

RESUME

L'activité de pilotage implique une étroite collaboration entre les pilotes. En effet, même si ceux-ci partagent un espace co-localisé, leur besoin en matière de conscience mutuelle correspond davantage à une collaboration à distance. Compte tenu de la séparation des tâches, ils doivent agir et regarder dans des directions parfois opposées tout en assurant une bonne coordination de l'activité globale. La parole, l'expressivité gestuelle et la disposition des contrôleurs physiques sont des moyens importants pour transmettre les informations utiles à la conscience mutuelle de la situation au sein du poste de pilotage.

Cependant, dans les postes de pilotage des avions de ligne, les écrans tactiles sont en train progressivement de remplacer les contrôleurs physiques. Malgré les nombreux avantages des interactions tactiles et des affichages dynamiques, cela génère un problème dans le partage des informations transmises par les gestes entre les deux pilotes. Les gestes sont à la fois moins perceptibles et moins compréhensibles. L'objectif de ce travail de thèse est de combler ce déficit d'information en proposant un moyen de représenter, à même l'interface numérique tactile, les bonnes propriétés des gestes physiques, et ceci afin de préserver la capacité des pilotes à se coordonner.

Pour cela, nous proposons la conception d'un système de représentation graphique permettant de suppléer les gestes effectués par les pilotes sur l'interface tactile. A partir de la littérature spécialisée et d'une analyse de l'activité gestuelle, nous avons identifié neuf informations produites par les gestes physiques et qui doivent idéalement être reproduite dans l'interaction avec l'interface numérique tactile. En complément, nous avons mené un état de l'art sur les représentations des gestes. Nous proposons une représentation iconique et abstraite en rupture avec les représentations basées sur la morphologie de la main. Des représentations ont été conçues et évaluées par des pilotes lors d'ateliers participatifs. Notre travail montre une nouvelle manière de représenter les gestes et permet d'identifier les informations recherchées par les pilotes afin qu'ils soient en capacité d'assurer leur conscience mutuelle. Par ailleurs, il apparait que les représentations des gestes ont des statuts d'importances différentes selon la situation, allant parfois jusqu'à être inutiles.

ABSTRACT

The flying activity involves close collaboration between pilots. Indeed, even if they share a co-located space, their need for mutual awareness is more a matter of collaboration at a distance. Given the separation of tasks, sometimes they must act and look in opposite directions while ensuring proper coordination of the overall activity. Speech, gestural expressiveness and the disposition of physical controllers are important means of transmitting useful information to the mutual awareness of the situation in the cockpit.

However, in airliners cockpits, touch screens are gradually replacing physical controllers. Despite the many advantages of touch-based interactions and dynamic displays, this creates a problem in sharing the information transmitted by the gestures between both the pilots. The gestures are less perceptible and less understandable. The objective of this thesis work is to fill this information gap by proposing a way to represent, within the touch screen, the good properties of physical gestures in order to preserve the pilots' ability to coordinate.

To do this, we propose to design a graphical representation system to supplement the actions performed by the pilots on the touch screen. Based on the literature and an analysis of gestural activity, we have identified nine types of information produced by physical gestures that should ideally be reproduced in the interaction with the touch screen. In addition, we conducted a state of the art on the representation of gestures. We proposed an iconic and abstract representation that breaks with representations based on the morphology of the hand. Representations were designed and evaluated by pilots in participatory workshops. Our work shows a new way of representing gestures and allows us to identify the information needed by pilots so that they are able to ensure their mutual awareness. Moreover, it appears that the representations of gestures have different statuses of importance depending on the situation, sometimes going so far as to be useless.

REMERCIEMENTS

A l'issue de ce travail de thèse je voudrais remercier chaleureusement toutes celles et tous ceux qui ont contribué à le rendre possible. Je remercie également l'ensemble des personnes qui indirectement m'ont permis d'atteindre ce doctorat depuis mon certificat d'aptitude professionnel en ébénisterie.

Je tiens d'abord à remercier mes deux directeurs de thèse, Catherine Letondal et Xavier Guchet, pour la qualité de l'encadrement et la richesse des échanges. C'est avec une sincère émotion que j'adresse un remerciement tout particulier à Jean-Luc Vinot qui a joué un rôle très important dans la réussite de cette thèse grâce à la pertinence de ses conseils. Je dédie ce manuscrit à ce designer graphique curieux, talentueux et exigeant, emporté peu de temps avant le jour de la soutenance.

Je remercie très respectueusement l'ensemble des membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail. Je tiens à remercier Franck Poirier et Pascal Salembier, rapporteurs de ce manuscrit, ainsi qu'Aurélien Tabard et Emmanuel Gardinetti, examinateurs de ce travail.

Je remercie Didier Bazalgette de la Direction Générale de l'Armement pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce travail doctoral.

Je remercie l'ensemble des membres des équipes Airtius et Informatique Interactive (permanents, doctorants et stagiaires) pour les nombreux moments de partage qui ont fait évoluer la réflexion de ce travail.

Je remercie l'ensemble des pilotes amateurs et professionnels, ainsi que les instructeurs pour leurs disponibilités et leurs participations.

Je remercie Sergine Pelvilain pour son précieux travail de relecture.

Enfin, je ne remercierai jamais assez mon épouse, Audrey, pour sa patience, son écoute et ses encouragements durant ces trois années éprouvantes et exigeantes.

PUBLICATIONS

Valentin Becquet, Catherine Letondal, Jean-Luc Vinot, Sylvain Pauchet. How do Gestures Matter for Mutual Awareness in Cockpits? Disclosing Interactions through Graphical Representations. In *DIS'19 Designing Interactive Systems 2019, Jun 2019, San Diego, United States*.

<https://doi.org/10.1145/3322276.3322306>

Pascal Béger, **Valentin Becquet**, Sébastien Leriche, Daniel Prun. Contribution à la formalisation des propriétés graphiques des systèmes interactifs pour la validation automatique. In *Afadl 2019, 18èmes journées Approches Formelles dans l'Assistance au Développement de Logiciels, Jun 2019, Toulouse, France*.

<https://hal-enac.archives-ouvertes.fr/hal-02165690>

Sylvain Pauchet, Jean-Luc Vinot, Catherine Letondal, Alexandre Lemort, Claire Lavenir, Timothée Lecomte, Stéphanie Rey, **Valentin Becquet** and Guillaume Crouzet. Multi-plié: a Linear Foldable and Flattenable Interactive Display to Support Efficiency, Safety and Collaboration. In *CHI 2019, Conference on Human Factors in Computing Systems, May 2019, Glasgow, United Kingdom*.

<https://doi.org/10.1145/3290605.3300384>

Sylvain Pauchet, Catherine Letondal, Jean-Luc Vinot, Mickael Causse, Mathieu Cousy, **Valentin Becquet**, Guillaume Crouzet. GazeForm: Dynamic Gaze-adaptive Touch Surface for Eyes-free Interaction in Airliner Cockpits. In *DIS 2018, Designing Interactive Systems 2018, Jun 2018, Hong-Kong, China*.

<https://doi.org/10.1145/3196709.3196712>

Catherine Letondal, Jean-Luc Vinot, Sylvain Pauchet, Caroline Boussiron, Stéphanie Rey, **Valentin Becquet**, and Claire Lavenir. Being in the Sky: Framing Tangible and Embodied Interaction for Future Airliner Cockpits. In *TEI 2018, 12th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interactions, Mar 2018, Stockholm, Sweden*.

<https://doi.org/10.1145/3173225.3173229>

CONTEXTE DE LA THESE

Ce travail de recherche cofinancé par la Direction Générale de l'Armement (DGA) et l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC) est une thèse pluridisciplinaire. Elle a été menée pendant trois ans dans les locaux de l'équipe « Informatique Interactive » (l'Ell) à l'ENAC sous la co-direction du Dre. Catherine Letondal, enseignante-chercheuse en informatique de l'Ell, et de Monsieur le Professeur Xavier Guchet, enseignant-chercheur en philosophie au laboratoire Connaissance, Organisation et Systèmes Techniques (CosTech) de l'Université Technologique de Compiègne (UTC).

Cadre d'observation et d'analyse pour comprendre l'activité de pilotage

L'étude que nous présentons sur l'activité des pilotes au chapitre 1 et l'analyse spécifique aux comportements gestuels présentée dans le sous-chapitre 2.3 sont basées sur trois éléments : la littérature spécialisée, des interviews contextualisées avec des pilotes professionnels menées dans le cadre du projet Airtius, des observations menées en simulateurs et en vols réels.

Airtius est un projet cofinancé par l'Agence nationale de la recherche (ANR) et la Fondation de Recherche pour l'Aéronautique et l'Espace (FRAE). Il regroupe deux organismes publics : l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC) et l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE) ; et trois entreprises privées spécialisées dans le design et l'ingénierie en informatique : Astrolab, Ingenuity io et Intactile. L'objectif scientifique du projet Airtius est de proposer une approche mixte des interfaces en « intégrant au tactile des objets physiques et des interactions dans l'espace physique »¹ face aux problèmes générés par les interactions tactiles pour les pilotes. Vis-à-vis de ce projet, nous nous focalisons sur le travail d'observation mené entre mars 2016 et avril 2017 avec huit pilotes professionnelles d'aviation commerciale. Ce travail implique 1 séance d'entretien contextuelle dans un avion léger au sol, 1 séance d'observations sur un vol commercial, 2 séances d'entretien contextuelles et 3 séances d'observations sur un simulateur non certifié de l'ENAC (cf. Figure 1).

¹ www.airtius.net



Figure 1. Séance d'observation d'un équipage de pilotes sur un simulateur non certifié de l'ENAC.

Ajoutons à cela 6 ateliers d'idéations permettant aux pilotes d'exposer leurs réactions autour de croquis de concept ou de prototypages. Toutes les séances d'observations (environ 5h) et d'ateliers (environ 20h) ont été enregistrées et partiellement retranscrites (environ 450 pages) puis analysés par Jean-Luc Vinot (Enseignant-chercheur à l'ENAC et responsable du projet), Catherine Letondal (Enseignante-chercheuse à l'ENAC), Sylvain Pauchet (chercheur à l'ENAC et dirigeant d'Astrolab), Stéphanie Rey (ingénieur de recherche à l'ENAC) et moi-même. A partir de cela, au total 260 citations ont été sélectionnées et regroupées en catégories (e.g. Automatismes, Rythme, Spatial, Geste) et sous-catégories (e.g. précision, musique, cross check) dans une base de données relationnelles (cf. Figure 2) pour former des clés de compréhension sur l'activité de pilotage (Letondal et al. 2018). Ma présence dans ce projet débute en octobre 2016 (date de début de contrat doctoral) ce qui signifie que je n'ai pas participé physiquement aux séances antérieures à cette date. Néanmoins j'ai eu accès à la totalité des enregistrements vidéo et j'ai participé à leurs retranscriptions.

verbatims.airtius.net/production/index.php			
doigts] Est-ce que l'avion est intégré ? Est-ce que je dois descendre ?			
je dirais au niveau ergonomique, j'adore le mini-manche de Airbus. Le side-stick. On fait corps avec l'avion [serre la main gauche]. Enfin, j'ai appris à faire corps avec cet avion-là.	Feedback, Contrôle, Ergonomie, Gestes,	sens qui contrôle l'action, expérience, précision, bonne conception,	Modifier
La remise des gaz est quelque chose de relativement anxiogène pour un pilote. Le problème de ces avions-là c'est qu'il y a tout une gestuelle à avoir et il y a une gestion d'automatismes. Ce n'est pas que la remise des gaz c'est compliqué, parce que tout pilote est capable de faire une remise de gaz en avion léger... il n'y a pas d'automatisme c'est facile, on met une assiette, une poussée et l'avion monte. Là, il y a tout un ensemble d'automatismes à gérer, et c'est ça qui fait peur aux pilotes	Automatisme, Gestes, Charge cognitive,	conflit PA / pilote, incohérence, collaboration avec automatisme, gérer les automatismes, geste pour gérer, anxiété,	Modifier

Figure 2. Base de données relationnelles du projet Airtius.

Toutes les citations des paroles des pilotes sont anonymisées. Dans le manuscrit, nous utiliserons régulièrement ces citations pour appuyer nos analyses. Elles apparaîtront sous cette forme : « je dirais au niveau ergonomique, j'adore le mini-manche de Airbus. Le side-stick. On fait corps avec l'avion. Enfin, j'ai appris à faire corps avec cet avion-là ».

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
1 CONTEXTE AERONAUTIQUE	9
1.1 ACTIVITE DE PILOTAGE	11
1.1.1 Composition d'un équipage	11
1.1.2 Répartition des tâches	12
1.1.3 Phases de vol.....	15
1.1.4 Flots procéduraux	15
1.2 CONSCIENCE DE LA SITUATION.....	17
1.2.1 Définition de la conscience de la situation	18
1.2.2 Modalités de perception pour accéder à l'information.....	20
1.2.3 Organisation de la mémoire.....	22
1.2.4 Les limites de la conscience de la situation	23
1.3 CONSCIENCE MUTUELLE	24
1.3.1 Définition de la conscience mutuelle	24
1.3.2 L'importance des gestes	26
1.4 VERS UNE IMPLEMENTATION DES SURFACES TACTILES.....	27
1.4.1 Évolution des interfaces avioniques	27
1.4.2 Surfaces tactiles, avantages et limites	32
1.4.3 Enjeux pour la conscience mutuelle.....	40
1.5 CONCLUSION	40
2 COMPRENDRE LES GESTES	43
2.1 ANALYSE DES GESTES NUMERIQUES PAR LE PRISME DE LA CONCEPTION	49
2.1.1 Caractérisations implicites et tributaires des contraintes technologiques	49
A Contraintes d'identification.....	50
B Contraintes de discrimination	53
C Contraintes d'utilisabilité	58
D Conclusion	60

2.1.2	Caractérisations réflexives des dimensions des gestes.....	61
A	Modalités d'entrée et de sortie.....	61
B	Identification	63
C	Coordonnées	64
D	Temporalité.....	65
E	Mouvement	66
F	Statut	68
G	Fonctions	68
H	Conclusion.....	72
2.1.3	Discussion	73
2.2	LE GESTE, TEMOIN DU COMPORTEMENT HUMAIN	73
2.2.1	Laisser les utilisateurs concevoir leurs gestes numériques.....	74
2.2.2	Définitions des gestes en Sciences Humaines et Sociales	74
2.2.3	Définir le geste par rapport à la parole	77
2.2.4	Apprendre pour contrôler ses mouvements.....	78
2.2.5	Rythme et dextérité, des indicateurs de performance	79
2.2.6	Conclusion	80
2.3	ANALYSE DU COMPORTEMENT GESTUEL DES PILOTES.....	80
2.3.1	Méthode.....	80
2.3.2	Observations	82
A	Rôles et domaines de responsabilité	83
B	Médium d'informations.....	86
C	Geste atomique et flot procédural.....	87
D	Rythmes et temporalités.....	88
E	Spatialisation des contrôleurs	88
F	Intentionnalité.....	89
G	Technicisation et automatisation des gestes	89
2.3.3	Conclusion	89
2.4	DISCUSSION DES DIMENSIONS.....	90
2.5	CONCLUSION	92
3	CHOIX DE REPRESENTATION	95
3.1	DEFINIR LE STATUT DU DISPOSITIF DE REPRESENTATION	99
3.1.1	Définitions de la suppléance et de la substitution	99
3.1.2	Choix du mode de représentation iconique face au modes enactif et symbolique.....	99
3.1.3	Enrichir la vision focale pour suppléer la vision ambiante.....	100
3.2	ÉTAT DE L'ART SUR LES REPRESENTATIONS GESTUELLES.....	101
3.2.1	Cas de substitution en situations distribuées.....	102

3.2.2	Cas de suppléance en situations co-localisées	105
3.2.3	Influences de l'art figuratif sur la représentation gestuelle.....	107
3.2.4	Les limites des représentations morphologiques.....	108
3.3	MONTRER L'EXPERIENCE GESTUELLE.....	111
3.3.1	Le représentationnalisme ou l'importance de montrer l'expérience gestuelle.....	112
3.3.2	Convergence de l'expérience gestuelle avec les informations avioniques.....	113
3.4	CADRE DE CONCEPTION POUR LA REPRESENTATION GRAPHIQUE	115
3.4.1	Règles de représentation des gestes numériques pour l'apprentissage.	115
3.4.2	La Sémiologie Graphique.....	116
3.4.3	La Gestalt.....	119
3.4.4	Règles de performance visuelle pour atteindre la pré-attentivité	120
3.5	CONCLUSION	121
4	METHODE DE DESIGN.....	123
4.1	CREATION ET IDEATION	125
4.1.1	Cartes de support à la conversation	125
4.1.2	Phase préliminaire de croquis.....	126
4.1.3	Une piste de recherche abandonnée.....	128
4.1.4	Réorientation vers une nouvelle proposition de design : <i>GestureView</i> ..	130
4.2	PROTOTYPAGE DES DESIGNS DE GESTUREVIEW	132
4.2.1	Conception des représentations basées sur des scénarios de pilotage.	132
4.2.2	Implémentation avec Smala, un langage réactif.....	133
4.3	ENVIRONNEMENT D'EVALUATION	133
4.3.1	Conception d'une plateforme modulable	133
4.3.2	Transcriptions et production d'insights.....	134
4.4	CONCLUSION	134
5	RECHERCHE PAR LE DESIGN : GESTUREVIEW.....	137
5.1	CONCEPT DE GESTUREVIEW	139
5.2	PRESENTATION DES CROQUIS	139
5.2.1	Localisation	140
5.2.2	Temporalité.....	141

5.2.3	Mouvement	142
5.2.4	Statut.....	142
5.2.5	Identification.....	143
5.2.6	Trace.....	145
5.2.7	Complétude, Rôle et Intention.....	145
5.3	METHODE.....	146
5.3.1	Walkthrough.....	146
5.3.2	Plateforme.....	147
5.3.3	Scénarios.....	150
5.4	PRESENTATION DES DESIGNS.....	150
5.4.1	Design 1 : <i>Honeycomb</i>	151
5.4.2	Design 2 : <i>Timeline</i>	152
5.4.3	Design 3 : <i>Bricks</i>	153
5.4.4	Design 4 : <i>Onion</i>	154
5.4.5	Design 5 : <i>Finger Shadow</i>	155
5.4.6	Design 6 : <i>Button Shadow</i>	156
5.4.7	Design 7 : <i>Blurring</i>	157
5.4.8	Design 8 : <i>Rim Texture</i>	158
5.5	RESULTATS	158
5.5.1	Identification du système implicite sans spatialisation	159
5.5.2	La complétude	159
5.5.3	Les dimensions temporelles dans la conscience mutuelle.....	160
5.5.4	Niveaux de conscience et de coordination dans la collaboration.....	162
5.5.5	La matérialité.....	163
5.6	DISCUSSION	164
5.7	CONCLUSION	165
6	EVALUER GESTUREVIEW EN CONTEXTE COLLABORATIF.....	167
6.1	METHODE.....	169
6.1.1	Description du système.....	169
6.1.2	Design : <i>GestureView</i>	175
6.2	ATELIERS	178
6.2.1	Sessions d'évaluations qualitatives avec les pilotes	179
6.2.2	Sessions d'évaluations quantitatives avec les utilisateurs non-experts...	180
6.3	RESULTATS	182

6.3.1	Résultats avec les pilotes	182
A	Percevoir l'erreur « pré-attentivement » pour engager le dialogue	182
B	Les dimensions de temporalité et de trace	183
C	Suppléer le geste, un concept accepté par les pilotes	185
D	Accentuer la complétude	185
6.3.2	Discussion avec les pilotes	186
6.3.3	Résultats avec les utilisateurs non-experts	187
A	Tâche principale : La mémorisation des checklists	187
B	Tâche secondaire : La performance dans la tâche de tracking.....	188
6.3.4	Discussion avec les utilisateurs non-experts.....	189
6.4	CONCLUSION	190

CONCLUSION ET PERSPECTIVES 192

TABLE DES FIGURES 200

BIBLIOGRAPHIE 206

INTRODUCTION

L'efficacité des activités collaboratives dans les domaines distribués (interactions entre des utilisateurs à distance), co-localisés (interactions entre des utilisateurs présent au sein d'un même espace) et mixte (interactions simultanées entre des utilisateurs distribués et co-localisés) dépend de la qualité de la « conscience » (*awareness*) dont les individus disposent pour coordonner leurs actions. D'une part, cette conscience désigne la compréhension « de la situation » pour celui qui construit sa propre réalité. A ce stade, elle est individuelle et dépend des besoins opérationnels (Wickens 2002). Mica Endsley la définit comme « la perception des éléments d'un environnement dans un volume de temps et d'espace, la compréhension de leur signification et la projection de leur état dans un futur proche » (Endsley 1995, p36). D'autre part, cette conscience implique le partage d'information entre les individus. Il s'agit de la « conscience mutuelle » (Stanton et al. 2017) ou dite « collaborative » (C. Heath and Luff 1992). Chaque individu partage des informations avec le groupe afin d'établir une dynamique sociale propice à l'optimisation des actions. Kjeld Schmidt précise : « 'awareness' is not the product of passively acquired 'information' but is a characterization of some highly active and highly skilled practices » (Schmidt 2002, p292). C'est un processus conscient et actif où l'importance de pouvoir « observer » (Hutchins and Nomura 2011, p40) l'autre est très important. Les individus ont une conscience de l'autre parce qu'ils ont accès à leurs gestes et à leurs paroles, seules ou « juxtaposées » à des « artefacts matériels ».

« Les corps des pilotes sont une ressource clé dans le processus de conceptualisation de leur monde et des actions qu'ils y entreprennent. La conceptualisation n'est pas seulement multimodale, elle peut aussi être un projet de collaboration. L'éventail des relations possibles d'élaboration mutuelle entre ressources sémiotiques (e.g. geste, parole) est extrêmement riche en énoncés multimodaux construits en collaboration et produits par des experts engagés dans une activité conséquente dans un cadre culturellement construit. Les significations émergent de **la juxtaposition de gestes et de mots avec des artefacts matériels, avec son propre corps et le corps des autres, avec ses propres mots et les mots des autres, et avec ses propres gestes et les gestes produits par les autres.** » (Hutchins and Nomura 2011, p43)

Dans ce travail de thèse, nous nous intéressons à l'activité collaborative des pilotes. En effet, dans les postes de pilotage actuels des avions de ligne, la perception des gestes par les pilotes, sur les contrôleurs physiques des fonctions avioniques, joue un rôle important dans la coordination de l'équipage. En effet, chaque contrôleur correspond à une fonction unique ou à une série de fonctions inhérentes au fonctionnement d'un système avionique spécifique

(e.g. système de gestion de l'électricité, système de gestion du carburant, système de gestion des phares). Lorsqu'un pilote agit sur un contrôleur physique, le co-pilote identifie la fonction (ou le système visé) ainsi que l'intention de l'action. Ces phénomènes sont possibles parce que les pilotes connaissent parfaitement la disposition spatiale de chaque contrôleur mais également parce que les gestes exécutés correspondent obligatoirement à des flots procéduraux. Ils sont soit appris en amont et répétés à chaque vol (e.g. flot procédural pour allumer les moteurs lors des vols en situation nominale) soit ils interviennent dans le cas d'une checklist lors d'une situation anormale (e.g. perte d'une génératrice en croisière). A travers leurs expressivités, les gestes traduisent le comportement des pilotes. Ils participent par leurs singularités à la constitution d'une conscience mutuelle requise pour réaliser de manière sécurisée la mission du vol. Les pilotes sont toujours en train de surveiller (à un degré relatif) le comportement gestuel de l'autre. Ils sont formés pour sélectionner les informations utiles à la coordination des opérations (e.g. un signal oral ou visuel pour engager une procédure). Cette coordination est nécessaire car bien que partageant le même espace de travail, ils regardent des informations différentes, parfois dans des directions totalement opposées. En effet, l'activité de pilotage d'un avion de ligne est composée d'un ensemble de tâches complexes distribuées entre deux pilotes : le pilot flying (PF) et le pilot monitoring (PM). Le premier est responsable du pilotage de l'avion et concentre son regard à l'extérieur du poste de pilotage tandis que le second surveille les systèmes avioniques et focalise son regard à l'intérieur de l'appareil. Cette séparation des tâches conduit les deux pilotes à collaborer ensemble pour coordonner leurs actions afin d'assurer la mission du vol en toute sécurité. Néanmoins et malgré la proximité spatiale entre eux puisqu'ils sont assis côte à côte dans l'habitacle, en plus d'avoir un accès visuel permanent sur leurs comportements, les pilotes organisent après chaque intervention sur les surfaces avioniques un moment de partage pour surveiller la conformité des actions engagées avec les exigences du vol.

Avec l'intégration progressive des écrans tactiles dans les postes de pilotage, nous craignons au regard de la littérature scientifique, une diminution de la qualité de la conscience mutuelle entre les pilotes en cas de remplacement totale des contrôleurs physiques. En effet, de nombreuses études montrent que les interactions tactiles sont moins compréhensibles dans un contexte de travail collaboratif co-localisé (Cohen and McGee 2004; Vinot et al. 2016; Speelpenning et al. 2011; Eckstein 2019) et impliquent une attention cognitive plus importante (Buxton, Hill, and Rowley 1985; Noy et al. 2004; Tory and Kincaid 2013). Néanmoins, parce que nous sommes favorables à leurs intégrations du fait de leurs atouts à la fois pour les pilotes (e.g. interaction directe, affichage dynamique et personnalisable, adaptabilité au contexte) mais également pour les industriels (e.g. réduction de coût de maintenance, diminution des câbles électroniques) **nous proposons d'engager notre travail de recherche sur la mise en place d'une solution visant à suppléer les gestes numériques produits sur ces interfaces tactiles. L'objectif de cette suppléance est d'assurer une conscience mutuelle de bonne qualité pour la sécurité d'un vol.** Nous utilisons le terme de suppléance et non de substitution puisqu'il n'est pas question de « remplacer » le geste numérique par une représentation identique. Avec l'interaction tactile, le geste est toujours perceptible par l'équipage dans l'espace partagé

malgré certaines contraintes comme la diminution de l'expressivité (e.g. à cause de l'affichage dynamique de l'écran), ou la complexité d'identifier l'action engagée avec le système avionique soit à cause de l'absence de relief des interfaces soit par l'occultation de celles-ci par la main (notamment à cause des vibrations (Hong et al. 2011)).

Dans la littérature spécialisée, Saul Greenberg et Carl Gutwin (Saul Greenberg and Gutwin 2016) ont énoncés cinq questions de recherche (QR) inhérentes à la conception d'un dispositif de représentation des individus dans le cadre de situation mixte. Nous positionnons notre travail de recherche par rapport à deux de ces questions, la question (1) relative à l'identification des informations critiques utiles à la conscience mutuelle que nous nommerons « dimensions » et la question (5) sur le choix de la représentation à adopter pour restituer ces dimensions. Nous n'aborderons pas dans ce manuscrit les trois questions restantes néanmoins nous les mentionnons puisqu'elles peuvent constituer des pistes de recherche pour continuer et enrichir ce travail de recherche.

(QR1) "What types of awareness information is crucial and should thus be added to the 'blank slate' of a screen sharing system?"

(QR2) "How can that awareness information be captured through technology, and what information will be lost during this capture process?"

(QR3) "How should that information be translated, transformed and encoded into a digital form, and—as part of that—what information will be altered as part of that translation process?"

(QR4) "How will that information be transmitted, and what are the network effects (e.g., delays, bandwidth requirements) in terms of that information being received in a timely manner?"

(QR5) "How will that information be represented to other participants in order to enable the rich and subtle interactions that occur in the face-to-face setting?"

La première question de recherche concerne l'identification des informations améliorant la conscience mutuelle entre les individus. A notre connaissance, il n'existe pas de cadre énonçant ces dimensions pour le comportement gestuel des pilotes. Nous proposons une adaptation de cette question de recherche (QR1 par Greenberg et Gutwin) par rapport à notre travail.

Quelles sont les dimensions (informations critiques) constitutives des gestes qui participent à la conscience mutuelle ?

Pour identifier ces dimensions, il existe au minimum deux méthodes. La première consiste à analyser les comportements gestuels des pilotes puis d'en extraire ce qui « relève » d'un intérêt pour la conscience mutuelle indépendamment des contraintes technologiques propres aux dispositifs numériques. A l'inverse, la seconde méthode consiste à définir en premier lieu les capacités de ces mêmes dispositifs pour ensuite établir une analyse de l'activité gestuelle. La seconde possibilité s'avère plus efficace pour faciliter la mise en place d'un cadre permettant d'établir une analyse des dimensions des gestes plus efficace. Cet argument est issu de notre propre expérience et ne relève d'aucune justification scientifique.

Néanmoins, lorsque nous avons essayé la première méthode, il était impossible de « savoir quoi regarder ». Dans un premier temps, nous proposons de construire de manière incrémentale un cadre de dimension des gestes basé sur la conception des gestes numériques. A l'aide d'un état de l'art, nous étudierons en deux temps ce qui détermine un geste numérique, d'abord, d'un point de vue implicite, c'est-à-dire un geste défini d'après les contraintes technologiques, puis d'un point de vue explicite. Ce second point de vue concerne des travaux de type « réflexifs » qui ont caractérisés explicitement les gestes numériques au regard de la littérature implicite. Nous présentons ce cadre de conception pour deux raisons. D'abord, parce que nous devons dans notre travail de conception être conscient des limites technologiques pour représenter les gestes des pilotes comme nous en avons déjà fait mention. Ensuite, nous pensons qu'exposer ce corpus scientifique est une illustration de la complexité inhérente à la définition des gestes, notamment sur la notion de la singularité gestuelle propre à l'individu. Pour identifier les « dimensions » des gestes numériques nous organiserons notre état de l'art sur les travaux réflexifs autour de huit caractéristiques. A l'issue de cette partie, un constat sera émis concernant la complexité par le seul prisme de l'informatique pour comprendre l'aspect singulier des comportements gestuels des individus. Nous présenterons un nouvel état de l'art basé sur les sciences humaines et sociales pour apporter des clés de compréhension sur la singularité des gestes techniques. Enfin, nous présenterons notre analyse issue de nos propres observations des gestes physiques des pilotes lors de plusieurs vols et en simulateurs. Au terme de ce travail d'investigation, nous proposerons neuf dimensions des gestes participant à la conscience mutuelle, qui seront évaluées par les pilotes par le biais de nos différentes propositions graphiques.

La deuxième question de recherche concerne le choix de la représentation pour restituer ces dimensions avec efficacité. D'une part, cette efficacité fait écho à la question de Greenberg et Gutwin : « to enable the rich and subtle interactions that occur in the face-to-face setting », d'autre part, la représentation nécessite vis-à-vis des exigences de l'activité de pilotage une recommandation d'être « pré-attentive ». Ce terme désigne un système de représentation où l'information est lisible en moins de 250 ms (Treisman 1985). Ce phénomène permet de réduire le délai d'acquisition de l'information par le système cognitif des pilotes et donc de donner davantage de temps pour traiter la situation. A nouveau, nous proposons une formulation spécifique à notre travail concernant cette question de recherche (QR5 par Greenberg et Gutwin).

Comment une représentation peut-elle restituer pré-attentivement la conscience mutuelle transmise par les dimensions des gestes numériques ?

Pour répondre à cette question, nous orientons d'abord notre démarche vers le choix d'utiliser une représentation majeure de type iconique incluant ponctuellement des représentations mineures de type symbolique. Nous écartons les représentations éactives qui incluent une plus grande contrainte de conception, notamment avec le risque d'une illusion sensorielle à cause d'une mauvaise perception tactilo-kinesthésique (e.g. phase de turbulences, fatigue). Nous poursuivons avec la présentation d'un état sur les

représentations iconiques des gestes utilisées pour des collaborations distribuées et pour les collaborations co-localisées. Au regard de cet état, nous constatons que la représentation des gestes s'effectue principalement par une analogie directe au corps humain. Les gestes sont représentés sous un aspect morphologique. Malgré les avantages de ce type de représentation, nous présenterons ses limites par rapport à l'ambition de notre question de recherche. Par ailleurs, nous proposons une hypothèse de justification pour cette tendance de représentation. L'art figuratif considère que la représentation visuelle doit retranscrire fidèlement l'ensemble des détails du corps en mouvement pour pouvoir le comprendre. A l'inverse, d'autres courants artistiques (e.g. cubisme, impressionnisme) qui utilisent l'abstraction considèrent qu'il n'est pas nécessaire de représenter la totalité de ces détails, « l'imaginaire » contribuant à créer le pont entre ce qu'il voit et la compréhension qu'il a du geste. En appliquant ce principe, nous étudierons deux principaux concepts théoriques. Nous aborderons d'abord le courant représentationniste avec la description des qualia. Cela nous permettra notamment d'identifier la notion « d'effet » des gestes. Puis nous présenterons le concept de convergence proposé par le philosophe Gilbert Simondon. Nous pensons que ce concept est une clé de conception pour répondre à notre question de recherche. Notre ambition sera de savoir s'il est possible de faire « converger » les informations des dimensions utiles à la conscience mutuelle provenant des gestes numériques avec des informations avioniques provenant de l'appareil. Enfin, pour nous aider à concevoir nos propositions de représentation, nous présenterons des outils comme par exemple la Sémiologie Graphique permettant de concevoir des graphiques pré-attentifs.

Pour explorer ces questions de recherche, nous produirons dans un premier temps une quantité importante de représentations des gestes par des croquis ou des modélisations informatiques à l'état de maquette (cf. Chapitre 5). Dans un second temps et à partir des résultats émis par les pilotes professionnels sur ces designs, nous développerons à un stade fonctionnel notre outil de suppléance des gestes numériques *GestureView* (cf. Chapitre 6). Pour évaluer à la fois la pertinence des dimensions par rapport à l'apport de la conscience mutuelle et la qualité pré-attentive de notre dispositif, nous mènerons des ateliers participatifs avec des pilotes professionnels et des évaluations quantitatives avec des utilisateurs non-experts.

Déroulé du manuscrit

Chapitre 1 : Ce chapitre présente une description de l'activité de pilotage spécifique à l'aviation civile. Nous présentons le fonctionnement d'un équipage et la distribution des tâches permettant l'accomplissement d'une mission de vol. Nous décrivons les principes de la conscience de la situation et de la conscience mutuelle. Ensuite, nous décrivons l'évolution des postes de pilotage afin de contextualiser l'intégration des écrans tactiles. Nous présentons les avantages et les limites de ces interfaces par rapport aux besoins des pilotes. Enfin nous précisons au terme de ce chapitre la problématique à l'origine de ce travail de recherche par rapport à la perception des interactions tactiles pour la conscience mutuelle.

Chapitre 2 : Ce chapitre nous permet de déterminer nos dimensions des gestes numériques à représenter pour la conscience mutuelle. Nous commençons par un état de l'art sur les travaux implicites et explicites permettant d'établir une compréhension des gestes numériques par le prisme de l'informatique. Ensuite, nous ouvrons notre étude à d'autres disciplines scientifiques (les sciences humaines et sociales) afin d'augmenter nos connaissances sur le geste. Il sera question du rapport à la parole, de l'apprentissage des gestes et du développement de la dextérité. Enfin, nous présentons une analyse que nous avons menée avec des pilotes professionnels afin de comprendre leurs comportements gestuels. Au terme de ce chapitre nous présentons neuf dimensions des gestes à représenter.

Chapitre 3 : Ce chapitre présente un état de l'art sur les représentations iconiques utilisées dans les collaborations distribuées et co-localisées. Nous présenterons une discussion autour de la représentation morphologique et affirmerons notre divergence par rapport aux besoins des pilotes. Nous poursuivrons avec la présentation du courant représentationnaliste puis avec la présentation du concept de convergence proposé par Gilbert Simondon. Enfin, nous décrivons quatre outils qui forment notre cadre de conception pour les représentations (guide de conception par Erin McAweeney, sémiologie graphique par Jacques Bertin, gestalt, règles de performances pour la visualisation).

Chapitre 4 : Ce chapitre présente la méthode de design. Nous débutons par la présentation des phases d'idéations. Nous présentons brièvement une piste avortée mais ayant contribué au développement de nos recherches. Ensuite nous présentons notre méthode de prototypage utilisée pour la conception de nos designs. Enfin nous décrivons l'environnement d'évaluation comprenant le cockpit modulable.

Chapitre 5 : Ce chapitre présente l'étude qualitative de huit propositions de représentation des dimensions des gestes. Nous commençons avec la présentation de notre concept de représentation avec *GestureView*. Ensuite nous décrivons des exemples de croquis à l'origine ayant alimentés notre réflexion. Nous poursuivons avec la présentation des ateliers participatifs avec les pilotes. Ensuite, nous décrivons nos huit propositions de représentations. Enfin nous discutons les résultats par rapport à nos deux questions de recherche.

Chapitre 6 : Ce chapitre présente l'étude qualitative et quantitative du système *GestureView* issu du travail exploratoire mené dans le précédent chapitre. Nous débutons par une description du fonctionnement du système avec la représentation graphique. Nous poursuivons avec la présentation d'une part des ateliers participatifs avec les pilotes et d'autre part des évaluations avec des utilisateurs non-experts. Enfin nous discutons les résultats des deux sessions d'ateliers par rapport à nos deux questions de recherche.

1 CONTEXTE AERONAUTIQUE

« Dans un système fonctionnel pourvu de repères de vitesse, l'effort de mémoire demandé aux pilotes est allégé. Ce qui était effectué sans les repères de vitesse – en mémorisant les vitesses, en consultant l'aiguille de l'anémomètre, puis en comparant les deux chiffres – est effectué grâce aux repères de vitesse par des jugements de proximité spatiale. La mémoire n'a pas été accrue, mais remplacée par un autre type de comportement cognitif. Ce qui est formidable, avec des dispositifs tels que les repères de vitesse, c'est qu'ils permettent des reconfigurations des systèmes fonctionnels en soulageant des ressources cognitives par ailleurs très sollicitées. Définir les repères de vitesses comme des « aide-mémoire » pour les pilotes, c'est confondre les propriétés cognitives du système fonctionnel réorganisé avec les propriétés cognitives de l'une de ses composantes humaines. Les repères de vitesse n'aident pas les pilotes à se souvenir des vitesses, mais font partie du processus à travers lequel le système du cockpit se souvient des vitesses. »

(Hutchins 1994, p467)

Dans notre travail de recherche nous nous intéressons aux impacts de l'intégration des interfaces tactiles, dans les postes de pilotage des avions de ligne, sur la conscience mutuelle entre les pilotes. En effet, l'activité de pilotage est une activité collaborative qui requiert l'accomplissement de tâches conjointes exécutées par un équipage de deux pilotes. L'équipage doit assurer un haut niveau de conscience mutuelle pour accomplir avec succès et sécurité la mission de vol. Actuellement, les postes de pilotage (cockpits) sont composés à la fois d'instruments visuels (écrans d'informations avioniques) ou sonores (alarmes) pour surveiller les états des systèmes, et de contrôleurs physiques (boutons, leviers, interrupteurs) pour contrôler les informations à transmettre à l'appareil. Néanmoins depuis quelques années ces panneaux de contrôles sont remplacés par des surfaces tactiles. Cela conduit à une transformation gestuelle des interactions et à un impact certain sur l'activité. Ce changement de paradigme a des conséquences sur le travail collaboratif puisque la perception des agissements du co-pilote est moins performante. Par exemple, l'affichage dynamique diminue la possibilité pour les pilotes d'associer l'emplacement d'un geste dans l'espace avec l'identification de la fonction engagée, comme c'est actuellement le cas avec un contrôleur physique disposé de manière fixe dans l'habitacle. Nous présenterons la problématique inhérente à ce constat puisqu'elle constitue le point de départ de nos investigations (cf. chapitres 2 et 3) et de nos designs (cf. chapitres 5 et 6).

Déroulé du chapitre

Nous commencerons par une analyse sur l'activité de pilotage (cf. 1.1) avec la composition de l'équipage, la répartition des tâches entre les pilotes et le déroulement d'un vol. Ensuite, nous étudierons la conscience de la situation car la performance de l'activité en est tributaire (cf. 1.2). Les pilotes doivent avoir continuellement une représentation mentale de l'état de l'avion. Cependant cette représentation se construit uniquement par l'analyse des informations représentées de manière iconique sur les instruments avioniques présents dans le poste de pilotage. En effet, les pilotes excluent de leurs représentations leurs sensations personnelles afin de ne pas avoir d'illusion de conscience sur la réalité de la situation. Nous aborderons le circuit de mémorisation des informations et les limites d'utilisation du canal visuel. Parce que l'activité dans le poste de pilotage s'effectue à deux, nous poursuivrons avec la définition de la conscience mutuelle et des moyens mis en œuvre par les pilotes pour la garantir (cf. 1.3). Enfin, nous introduirons notre problématique (cf. 1.4). D'abord, nous présenterons l'évolution des postes de pilotage afin de comprendre comment ces espaces ont déterminé l'activité gestuelle des pilotes. Puis nous aborderons les interfaces tactiles, leurs avantages et leurs limites par rapport au travail collaboratif.

1.1 ACTIVITE DE PILOTAGE

Le poste de pilotage (cockpit) d'un avion de ligne est un environnement complexe. Ses occupants, des pilotes, sont sélectionnés d'après leurs compétences cognitives, perceptives et psychologiques afin de contrôler la complexité de ses interfaces en toute situation. Le comportement gestuel est associé à la configuration des interfaces dans le poste de pilotage. L'objectif de ce sous-chapitre est de présenter l'activité de pilotage par rapport à son environnement. Nous décrivons la composition d'un équipage et la distribution des rôles avec les tâches associées, puis les phases classiques d'un vol. Ensuite, nous présenterons comment les pilotes assurent les flots procéduraux et les listes de vérification (*checklists*) pour assurer les tâches.

1.1.1 Composition d'un équipage

Jusqu'aux années 1960, face à la complexité de fonctionnement des avions de lignes et au manque d'automatisation des systèmes avioniques, l'activité de pilotage nécessitait l'implication de cinq pilotes « spécialisés » pour assurer conjointement l'ensemble des tâches nécessaires à un vol en toute sécurité (Helmreich and Foushee 2010).

Nous les présentons par ordre d'importance hiérarchique :

- (1) Le Commandant de bord (PIC ou *Pilot-in-Command*) ou « Captain » est le plus haut responsable décisionnaire de l'appareil. Il veille à la sécurité du vol et de ses passagers. Il est toujours assis en place avant gauche. Avec le Premier officier, ils assurent le pilotage de l'avion (maniement du manche, inclinaison des ailes, etc.).
- (2) Le Premier officier (FO ou *First Officer*) assiste le PIC dans ses tâches. Il est assis à sa droite.
- (3) L'Officier mécanicien (*Flight engineer également appelé Air engineer*) s'occupe de la surveillance et de la gestion des systèmes avioniques.
- (4) L'opérateur de la navigation (*Navigator Operator*) veille au respect du suivi de l'itinéraire du vol et propose des trajets alternatifs en cas de problème.
- (5) L'opérateur des radiotéléphonies (*Radio Operator*) assure la transmission des informations entre l'avion et les opérateurs au sol (contrôle aérien).

Entre les années 1960 et les années 1980, le développement technologique des postes de pilotage (cf. 1.4.1), accompagné d'une évolution de l'automatisation de la gestion des systèmes avioniques, ont conduit à la réduction du nombre de pilotes nécessaires dans le poste de pilotage et à la suppression des rôles spécialisés. Les pilotes généralisent leurs tâches. Les opérateurs de la navigation et des radiotéléphonies disparaissent. Leurs tâches sont redistribuées entre le pilote automatique et les trois pilotes restants. L'Officier mécanicien devient l'Officier mécanicien navigant.

L'arrivée du glass cockpit dans les années 1980 et son niveau d'automatisation ne nécessite plus la présence de l'Officier mécanicien navigant. L'ensemble des tâches de pilotage est à présent distribué entre deux rôles : le pilote (PF ou *Pilot Flying*) et le co-pilote (PNF ou *Pilot*

Not Flying). Pour simplifier la compréhension, le PNF est également appelé le pilote surveillant (PM ou *Pilot Monitoring*). Le PIC détermine au début de chaque vol l'affectation des rôles entre lui et le FO. Le statut hiérarchique est indépendant du rôle du pilote sauf dans le cas où l'avion est à l'arrêt. Le PIC devient obligatoirement PF.

1.1.2 Répartition des tâches

Pour accomplir la mission du vol, l'activité de pilotage regroupe quatre principales tâches (Abbott 1993). Elles sont organisées en suivant un ordre hiérarchique de priorité afin de gérer la complexité d'un problème. Il s'agit de l'ANCS (*Aviate, Navigate, Communicate, Monitor System*) (Wickens 2002; Schutte and Trujillo 1996) :

- (1) Piloter (*Aviate*), également appelé « *Fly the aircraft* » (e.g. *Ecram Action* d'Airbus) par les pilotes, consiste à assurer la trajectoire de l'avion et son inclinaison horizontale comme verticale (« assiette ») pour en garder la stabilité et éviter un décrochage par manque de portance. Cette tâche est affectée au rôle de Pilot Flying (PF). Pour l'accomplir il peut soit piloter manuellement en manipulant le manche (e.g. *yoke* dans les Boeing ou *sidestick* dans les Airbus) ou la manette des gaz par exemple, soit superviser l'ensemble des commandes du pilotage automatique (e.g. le FCU ou *Flight Control Unit* dans les Airbus et le FCS ou *Flight Control System* dans les Boeing) en réglant la vitesse (1), le cap (2), l'altitude (3) et la vitesse verticale de montée ou de descente (4) (cf. Figure 3).



Figure 3. A gauche, *Flight Control Unit* (FCU) de l'Airbus A320. Au milieu, *Yoke* standard produit par Boeing. A droite, *Sidestick* standard produit par Airbus.

Le PF contrôle les informations correspondantes au comportement de l'avion en regardant l'instrument de bord : *Primary Flight Display* (PFD) (cf. Figure 4) et en regardant l'environnement extérieur. Par exemple, le système PAPI (*Precision Approach Path Indicator*) permet de réaliser une approche correcte sur le plan vertical et de respecter la distance de freinage requise par la longueur de la piste (cf. Figure 4).



Figure 4. A gauche, interface du *Primary Flight Display* (PFD) de l'Airbus A380. A droite, système PAPI.

- (2) Naviguer (*Navigate*), consiste pour l'avion à se déplacer de son point d'origine jusqu'à un point de destination en passant par des points de route (*waypoints* ou *legs*) adaptés au type d'appareil (e.g. militaire, aviation de loisir, aviation commerciale) sans entrer en collision avec des obstacles (immeuble, avion, montagne). Le Pilot Monitoring assure cette tâche. Néanmoins le PF assure la tâche de pilotage en cohérence avec la navigation. Cette tâche est aujourd'hui fortement automatisée. A l'aide du système de gestion de vol (e.g. MCDU ou *Multi Control Display Unit* équipé du FMGC ou *Flight Management and Guidance Computers* pour Airbus et FMS ou *Flight Management System* pour Boeing) le PM sélectionne les points de route pour établir le plan de vol de la mission (cf. Figure 5). Ces points de route sont accessibles depuis la base de données de navigation (NDB ou *Navigation DataBase*). Ils sont définis par des normes standards (e.g. ARINC 424 *Navigation System Data Base Standard*). Les pilotes s'assurent que le plan de vol respecte les capacités énergétiques de l'avion par rapport à la distance et à la masse de l'appareil comme l'explique ce pilote : « En fait on règle des legs de trajectoire (et) on va donner des objectifs de consommation. Ils nous permettront de calculer, parce qu'on a très peu de marge énergétique, donc on saura si le plan de vol va tenir. Là on est de l'ordre de l'heure, plus 15 minutes de réserve sur laquelle il ne faut absolument pas voler ».



Figure 5. A gauche, *Multi Control Display Unit* (MCDU) sur l'Airbus A320. A droite, MCDU sur l'Airbus A350.

Le système de gestion de vol permet de déterminer la position précise de l'appareil dans l'espace. Il est connecté au moniteur de navigation (ND ou *Navigation Display*). Il s'agit d'un affichage représentant graphiquement les informations du plan de vol, la position de l'avion en temps réel et l'environnement extérieur (météorologie, obstacle fixes et mobiles, points d'intérêts comme les waypoints ou les pistes d'atterrissages) (cf. Figure 6).



Figure 6. *Navigation Display* (ND) affiché à la gauche du PFD de l'Airbus A380.

- (3) Communiquer (*Communicate*), correspond à la transmission des informations par des échanges à la fois dans le poste de pilotage, c'est-à-dire entre les pilotes, puis dans l'avion avec le personnel et les passagers, enfin dans l'environnement extérieur avec les contrôleurs aériens. Le PM est responsable de cette tâche. Il dispose d'un instrument dédié à la gestion des fréquences radio (e.g. RMP ou *Radio Management Panel* pour Airbus).
- (4) Surveiller les systèmes avioniques (*Monitor System*), est la tâche affectée comme son nom l'indique au Pilot Monitoring (PM). Le PM veille constamment à la cohérence des états des systèmes par rapport aux phases du vol et aux situations rencontrées. Il agit seul sur les panneaux de contrôles des systèmes. En tenant compte de l'évolution technologique des systèmes et des interfaces avioniques ainsi que de l'amélioration de leurs automatismes, Yixiang Lim (Lim et al. 2018) décompose cette tâche en trois composantes : la gestion des systèmes (*Manage System*), la gestion des données (*Manage data*) et la gestion de la mission (*Manage mission*).

Ces quatre tâches sont distribuées entre deux rôles : Piloter (1) pour le PF et Naviguer (2), Communiquer (3), Surveiller (4) pour le PM. En cohérence avec la répartition spatiale des contrôleurs et des instrumentations assurant l'accomplissement de ces tâches, l'utilisation de l'espace du poste de pilotage conduit à une séparation des zones d'entrée dans le système, en fonction du rôle du pilote et des différents systèmes avioniques conçus par les constructeurs. Ce sont les « aires de responsabilité ». Comme le décrit ce pilote, le PF possède dans son aire de responsabilité « tout ce qui est de contrôle de l'avion, [...] par contre tout le reste c'est le PM ». Lorsqu'un pilote agit sur l'aire de

responsabilité de l'autre pilote, par exemple pour l'aider dans sa tâche, alors il communique son action oralement « P1 : j'ai affiché le code transpondeur mais ce n'était pas mon aire de responsabilité. P2 : ouais il n'aurait pas dû le faire. P1 : C'est pour ça que je l'ai annoncé ».

1.1.3 Phases de vol

Le déroulé d'un vol est traditionnellement composé de sept phases : le pré-vol, le décollage, la montée, la croisière, la descente, l'approche et l'atterrissage (Corwin 1992; Tenney, Rogers, and Pew 1998; Schvaneveldt, Beringer, and Lamonica 2001)(cf. Figure 7). A chaque phase, les pilotes doivent réaliser collaborativement des procédures standards (SOPs ou *Standard Operating Procedures*) de modification des systèmes et de contrôle des informations avioniques pour veiller au bon déroulé du vol. Les phases les plus lourdes en termes de charge de travail sont en début de vol avec la phase de pré-vol (roulage sur les pistes) et la phase de décollage, puis en fin de vol avec les phases d'approche et d'atterrissage (Tenney, Rogers, and Pew 1998). Cela s'explique de trois manières : par la hausse des quantités d'actions à réaliser et d'informations à contrôler durant ces phases, par la pression temporelle de la prise de décision (du fait de la proximité avec le sol), par l'augmentation des échanges oraux entre l'équipage et les contrôleurs aériens. C'est pourquoi, l'équipage doit veiller à préparer en amont les problèmes potentiels que peut rencontrer l'avion en arrivant dans une nouvelle phase afin de pouvoir, le cas échéant, libérer le maximum de ressources cognitives nécessaires à l'évaluation des problèmes puis à la prise de décision des procédures à appliquer.

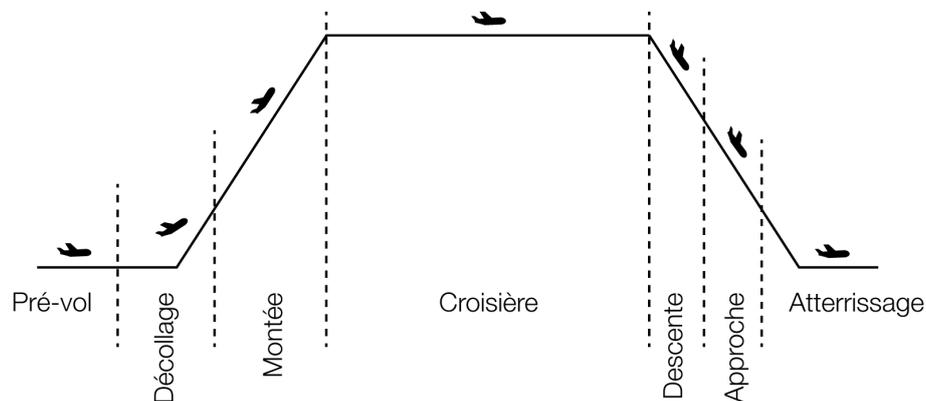


Figure 7. Les sept principales phases de vol (le pré-vol ou également appelé roulage, le décollage, la montée, la croisière, le descente, l'approche et l'atterrissage).

1.1.4 Flots procéduraux

Pour garantir de façon sécurisée le passage de chacune de ses phases, les pilotes réalisent des tâches inhérentes aux quatre tâches (cf. 1.1.1) par le biais de deux types de flots procéduraux : les procédures standards (SOPs ou *Standard Operating Procedures*) et

les procédures d'urgences (*Memories Items*). Les procédures standards s'adressent aux deux pilotes et comprennent des actions gestuelles à effectuer sur les interfaces des systèmes avioniques dans le poste de pilotage, des annonces orales, enfin des informations à contrôler par la vision. Ces dernières peuvent être potentiellement accompagnées par le contact de la main comme ce pilote le décrit : « parce qu'en fait on touche quand on passe sur les manettes on vérifie (...) que tous les boutons poussoirs sont bien en place ». Les SOPs sont répétées à chaque vol à l'inverse des procédures d'urgences. Les procédures d'urgences sont apprises en simulateur. Ce sont des flots qui doivent être effectués en réponse immédiate à un incident critique comme par exemple la détection d'un feu moteur durant la phase de décollage. Contrairement aux SOPs, ces flots impliquent obligatoirement des actions irréversibles sur les systèmes. C'est pourquoi, il y a des étapes de confirmation commune (*cross-check*) avant d'engager l'action. Par rapport à l'exemple précédent, les deux pilotes doivent être d'accord pour déclencher l'extincteur du moteur en feu.

A l'issu des procédures standards et des procédures d'urgences, les pilotes doivent contrôler ensemble, la bonne configuration des états des systèmes à l'aide de listes de vérifications normales (*Normal Checklists*, e.g. *Before Start Checklist*, *After Takeoff Checklist*) (A. Degani and Wiener 1993). La méthode est la suivante : le pilot flying (PF) appelle à faire la checklist correspondante et énonce oralement les actions requises (*mandatories*) par la procédure et le pilot monitoring (PM) contrôle si elles ont été réalisées en répondant oralement (e.g. « check », « clear ») (cf. Figure 8). Dans le cas où un item de la liste n'est pas conforme à la checklist, les pilotes engagent un dialogue et décident ensemble de l'action à effectuer en accord avec leurs rôles respectifs.



Figure 8. Le PF assis à droite lit la « Before Takeoff » checklist.

D'après les spécificités de la situation rencontrée durant le vol, il existe trois types de checklists : les listes de vérifications normales (*Normal Checklists*), les listes de vérifications anormales (*Abnormal checklists*) et les listes de vérifications urgentes (*Emergency Checklists*). Le premier type de checklists est lu en réponse à une procédure déjà réalisée (*challenge-*

1.2.1 Définition de la conscience de la situation

Mica Endsley définit la conscience de la situation comme « la perception des éléments d'un environnement dans un volume de temps et d'espace, la compréhension de leur signification et la projection de leur état dans un futur proche » (Endsley 1995, 36). Elle propose un modèle de la conscience de la situation basé sur trois niveaux (cf. Figure 10) :

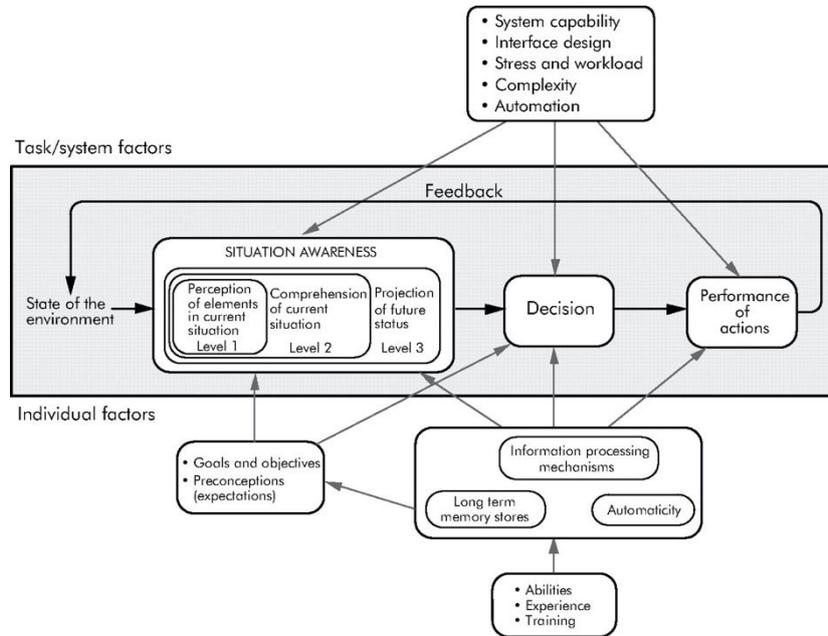


Figure 10. Modèle de la conscience de situation par Mica Endsley, 1995.

- (1) Percevoir les éléments d'intérêts dans un environnement (ou situation). A ce premier niveau, l'information est brute. Elle n'est associée à aucune interprétation. Par rapport à l'activité de pilotage, il s'agit pour l'individu d'acquérir des informations brutes données par les instruments de bord, le comportement de l'avion, l'équipage et l'environnement extérieur (Stanton, Chambers, and Piggott 2001). Plus spécifiquement, les pilotes sont entraînés pour guider leurs perceptions à chercher en priorité des informations concernant « les paramètres de vol, l'état de leurs systèmes à bord, leur propre localisation et la localisation des points de références importants et du terrain, et de la localisation des autres avions avec des paramètres de vol appropriés et leurs caractéristiques » (Endsley 1995, 164). Un pilote nous explique : « En fait quand on dit « on regarde » ... on n'a pas besoin d'y passer des heures pour prendre des informations : on sait ce qu'on cherche, on va aller capturer l'information dont on a besoin [...] c'est ce qu'on apprend en pilotage initial : tu vas chercher ton information, tu la fous dans ta tête, tu reviens sur tes instruments, et tu réfléchis à ce que tu dois faire ».
- (2) Comprendre les informations. Après avoir perçu l'information brute, l'individu l'assimile à une signification relative à la situation. A partir d'un « modèle mental en mémoire à long terme » (Endsley 1995) préalablement établi chez lui, c'est-à-dire un

ensemble de connaissances associé au fonctionnement de la situation (e.g. le fonctionnement d'un moteur en général), l'individu crée un « modèle de situation » (Endsley 1995) où il se représente les spécificités de la situation rencontrée. Le modèle de situation est uniquement associé à la situation vécue à un moment précis et unique. Avec l'expérience de l'individu, le modèle mental s'enrichit des spécificités des différents modèles de situations. De nombreuses études (McKeithen et al. 1981; Kilingaru et al. 2013; Larkin 1981) montrent que des experts prennent plus de temps que des novices pour analyser et comprendre les informations d'un problème parce qu'ils se construisent un modèle de situations plus complexes avec des représentations plus riches à l'inverse des novices qui tendent vers des modèles plus superficiels. L'enjeu de ce niveau pour les pilotes est d'une part, de produire le plus rapidement possible des modèles de situations pour s'adapter aux contraintes dynamiques de la mission de vol et d'autre part, une fois construit, de partager ce modèle entre les membres de l'équipage.

- (3) Projection des actions à réaliser. Cette troisième et dernière étape décrit la prise d'actions futures à réaliser d'après une évaluation de l'état de la situation. C'est également à ce niveau que l'utilisateur envisage les conséquences de son action sur l'état de la situation. Un pilote fait mention de cette anticipation permanente dans l'activité de pilotage : « quand on fait le vol comme ça sur le ND (*Navigation Display*). On a en fait, les terrains qui sont affichés. On fait ce qu'on appelle les cercles d'influence : typiquement, 100 nautiques, ce qui correspond à une descente sans moteur. Donc on les trace, et à chaque moment on sait, si on a un problème, quel terrain on va choisir ». Un autre exemple, « JFK (aéroport John Fitzgerald Kennedy à New York) est réputé pour le changement de piste, très tardivement, en fait on ne sait jamais trop sur quelle piste on va se poser, donc du coup on prépare plusieurs scénarios possibles. On va le savoir peut-être 5 ou 10 minutes avant l'interception ».

Ces trois niveaux cognitifs établissent les stades de la conscience de la situation. Ils sont dépendant des caractéristiques de l'individu (objectifs, croyances, capacités perceptives et cognitives, notamment la mémorisation des informations) et des caractéristiques de l'environnement (capacité du système, conception de l'interface, stress et charge de travail, complexité et niveau d'automatisation).

Wickens (Wickens and Alexander 2009) propose une spécialisation du modèle d'Endsley (Endsley 1995). Il détermine la performance de la conscience de la situation d'après « le déploiement d'une attention sélective et du traitement d'un modèle mental précis, de l'espace aérien, de la structure de l'avion et des procédures, dans lesquelles l'information attendue peut être aisément incorporée ». Les pilotes ont besoin d'avoir une attention sélective, c'est-à-dire la capacité de filtrer les informations brutes, pour optimiser la réalisation des tâches en économisant le plus possible de ressources de travail. Wickens identifie trois composants de la conscience de la situation :

- (1) La conscience spatiale. L'avion est un objet physique et dynamique qui évolue dans l'espace autour de six variables. Il y a « trois degrés de rotation (tangage, roulis, lacet) » et « trois degrés de déplacement (altitude, dérive latérale de la trajectoire de vol, et la position le long de la trajectoire) ». Elles sont toutes interdépendantes. De plus, en écho au premier niveau du modèle d'Endsley, l'appareil se déplace dans un environnement comportant ses propres variabilités météorologiques.
- (2) La conscience du système. Les pilotes doivent interagir avec un système automatisé et surveiller la cohérence entre l'état perçu sur les instruments de bord et les caractéristiques de performance adaptées à la situation.
- (3) La conscience des tâches. Les pilotes doivent avoir conscience de la réalisation des quatre tâches (piloter, naviguer, communiquer, surveiller les systèmes avioniques). Il faut qu'ils puissent comprendre à tout moment où ils en sont dans le déroulé du vol (e.g. phase, tâche).

La complexité pour les pilotes est de constamment actualiser ces trois composants pour décider des actions à réaliser afin d'être prêt à agir très rapidement compte tenu du dynamisme de l'environnement comme le souligne ce pilote-ci : « et pendant que je cherche quel est le meilleur endroit (pour atterrir suite à une panne), je m'approche, je m'approche, je m'approche des nuages et je n'ai toujours pas pris de décision » ou encore ce pilote-là : « parce que là on a une grosse charge de travail, et ce qui en plus encombre beaucoup, c'est qu'on est près du sol ».

1.2.2 Modalités de perception pour accéder à l'information

La conception des interfaces des postes de pilotages favorise presque exclusivement la « voie visuelle alphanumérique ou graphique » (Marotte 2004, 3). Le canal visuel est très utilisé par les pilotes que ce soit en vol à vue (VFR ou *Visual Flight Rules*) ou en vol assisté des instruments de bord (IFR ou *Instrument Flight Rules*). En effet, les pilotes font davantage confiance à ce qu'ils lisent sur l'instrumentation avionique qu'à ce qu'ils ressentent en matière de sensation (Letondal et al. 2018). Ils ne font pas confiance à leurs propres capteurs sensoriels et préfèrent avoir des informations « abstraites » (Letondal et al. 2018) comme l'évoque ce pilote : « c'est comme on apprend toujours : il faut croire en ton horizon artificiel. Il ne faut pas croire à tes sensations ». Lorsque les pilotes effectuent leurs flots procéduraux de surveillance des systèmes, ils réalisent des « processus contrôlés » (Schneider and Shiffrin 1977) de balayages à la fois visuels (*visual scanning*) (Conversy, Chatty, and Hurter 2011) mais également tactiles. La fonction tactilo-kinesthésique est très utile en complément, comme ce pilote en fait mention : « On tient le manche d'une main, et puis de l'autre on va travailler ici. Définir ses paramètres, vérifier qu'on garde son altitude, etc., aller manipuler. Ce qui veut dire qu'on va balayer, un coup ici, un coup ici, régulièrement. Si j'ai un bouton ici, je peux continuer à tenir mes paramètres, aller placer ma main approximativement, je vérifie, c'est bon..., je tourne un peu, hop. Et pendant que je tourne, je vois ce qui se passe... Hop, je regarde un

petit peu ici. Je peux balayer sans que ça pose de problème ». Les balayages suivent un ordre précis et sont déterminés d'après la disposition des instruments de bords et des contrôleurs physiques (cf. Figure 11). Ces « processus contrôlés » sollicitent une importante charge cognitive relative à leurs complexités (Miller 1956). Aussi, les pilotes ont pour objectif de développer la « dextérité » (cf. 2.2.5) de leurs corps afin d'automatiser la mémoire corporelle pour assurer ces tâches de surveillance, en réduisant la consommation de ressource de travail (Schneider and Shiffrin 1977; Matton et al. 2018). L'automatisme, par paroxysme, vise à contrôler l'information « sans y prêter attention » (Logan 1988).

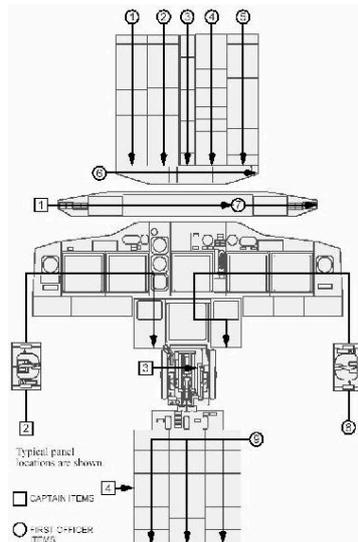


Figure 11. Balayage avant et après vol sur les Boeing de la série 737.

Le canal visuel peut être discriminé en deux catégories : la vision « focale » et la vision « ambiante » (Wickens 2002). La vision « focale » permet à l'individu de focaliser son regard sur une information précise. Dans le cas des pilotes, il s'agit d'une information sélectionnée avec soin d'après un flot procédural spécifique. A l'inverse, la vision « ambiante », c'est-à-dire la vision périphérique, est utilisée passivement par les pilotes. Cette vision est particulièrement sensible au mouvement, notamment avec le déplacement sur un plan spatial avec des caractéristiques de vitesse, de rythme (Bartram, Ware, and Calvert 2001), et de clignotement (Loft, Smith, and Bhaskara 2011).

Le canal auditif est utilisé par les alarmes sonores ainsi que pour la communication entre les deux pilotes et les contrôleurs aériens par des échanges radios. La communication orale est régie par une phraséologie, c'est-à-dire, un langage « opératif » (Mell 1992), codifié et conventionné initialement par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) puis, dans sa version française par la Direction générale de l'aviation civile (DGAC). Basée sur la langue anglaise, cette phraséologie est spécifique à la culture aéronautique. L'objectif est d'établir un langage commun facilement prononçable, où les sons peuvent être captés rapidement sans confusion afin d'assurer une bonne conscience de la situation (Benejean 2013).

1.2.3 Organisation de la mémoire

Pour percevoir l'information et l'analyser, la conscience de la situation nécessite l'utilisation de la mémoire. Mica Endsley distingue deux principales formes de mémoire : la « mémoire de travail » (WM ou *Working Memory*) et la « mémoire à long terme » (LTM ou *Long Term Memory*).

La mémoire de travail est une mémoire à court terme, elle est limitée par le nombre d'informations que l'individu pourra stocker. L'étude de Miller (Miller 1956) définit aux alentours de sept (entre 5 et 9) le nombre d'information maximum que la mémoire de travail peut conserver simultanément. La performance de cette mémoire est particulièrement bénéfique pour les pilotes puisqu'elle leur permet d'actualiser rapidement leurs « modèles de situation » (cf. 1.2.1.). En effet, le nombre d'informations pouvant être perçues et comprises rapidement est un facteur important dans la prise de décision, d'autant plus lors de période de stress (Gärtner et al. 2014) ou de pression temporelle (Coeugnet 2011).

La mémoire à long terme se définit comme un endroit « où l'information est stockée de façon quasi-permanente et dont la capacité de stockage est quasi illimitée, sous réserve d'intégrité du système nerveux central » (Chanquoy, Tricot, and Sweller 2007, 61). C'est dans cette mémoire que les pilotes stockent les modèles mentaux d'ingénieries relatives au fonctionnement de l'avion et de ses systèmes avioniques. Lacabanne (Lacabanne 2014) présente les deux principales catégories de LTM : la « mémoire procédurale » et la « mémoire déclarative ». D'abord, la mémoire procédurale contient les informations relatives aux procédures. « Ces connaissances renvoient aux savoir-faire et ne sont pas nécessairement explicites ». Il s'agit de ce que nous évoquions précédemment (cf. 1.2.2.) avec la mémoire gestuelle et visuelle. Ensuite, la mémoire déclarative « stocke toutes les informations conceptuelles, énonçables ». C'est pourquoi il y a « la mémoire sémantique » et la « mémoire épisodique ». La mémoire sémantique assimile une information sous la forme d'un mot et relie les mots entre eux par des « réseaux sémantiques ». Le seul moyen pour qu'une information acquise en mémoire de travail soit intégrée à la mémoire déclarative est qu'elle soit transcrite sémantiquement. De plus, elle ne peut exister seule, il doit y avoir « d'autres connaissances déjà présentes dans le chef du sujet ». Elle sera alors associée par proximité sémantique. Enfin, la mémoire épisodique fait référence aux informations temporairement conservées dans les « souvenirs ».

L'enjeu pour les pilotes est d'être capable de naviguer entre la mémoire à long terme et la mémoire de travail pour être capable de construire rapidement des modèles mentaux adaptés à la situation afin de prendre la décision opérationnelle la plus performante permettant d'assurer la réussite de la mission de vol. En tant que designer, notre objectif est de proposer un système assurant l'acquisition rapide d'information par la mémoire de travail des pilotes. Ce système doit être contraint par les capacités cognitives des pilotes en accord avec les besoins d'une conscience performante de la situation.

1.2.4 Les limites de la conscience de la situation

Atteindre une conscience de la situation performante en termes de temps de traitement de l'information et de qualité décisionnelle par rapport à un conflit est une opération complexe à mettre en œuvre pour deux raisons majeures.

La première raison est que la quantité d'informations à mémoriser pour assurer l'activité de pilotage est considérable pour les pilotes. C'est pourquoi, en plus des checklists (cf. 1.1.3.), d'après Edwin Hutchins (Hutchins 1994) les pilotes utilisent le poste de pilotage avec ses interfaces de contrôleurs physiques et d'écrans comme des prothèses mnémoniques. Ils externalisent leurs mémoires afin de pouvoir « lire », « écrire », « reconstituer » et « reconstruire le sens », gérer « l'organisation des représentations internes et externes » des informations avioniques. Pour ce faire, les pilotes utilisent les objets graphiques des interfaces avioniques et la disposition des objets physiques de l'habitacle (contrôleurs physiques, manuels de procédures) comme représentations iconiques. C'est par exemple le cas avec le repère graphique indiquant la « vitesse » à atteindre sur l'anémomètre. Il est certes moins précis que la correspondance masse/vitesse représentée textuellement sur la brochure des cartes de vitesse, néanmoins il forme une redondance malléable et adaptable à un moment particulier. En effet, les pilotes l'associent à une opération et à une temporalité. Ils n'ont pas à « se souvenir » des calculs. Il suffit de « localiser » l'information utile dans l'espace ou sur l'interface avionique. L'objectif de cette distribution cognitive est de libérer de la ressource de travail en réduisant au maximum l'information à traiter lors de l'instant t. Hutchins précise qu'« il ne s'agit pas simplement de retrouver des informations sur un élément stocké dans une mémoire interne, ni d'identifier ou de comparer une forme externe à un modèle interne. Il s'agit plutôt d'une combinaison d'identifications, de souvenirs, d'associations, de vérifications et de contre-vérifications, de constructions et de reconstructions, conduites en interaction avec un ensemble varié de structures représentationnelles, dont la plupart n'exigent pas de reconstruire cette représentation interne communément appelée mémoire des vitesses » (Hutchins 1994, 469).

Ce constat constitue une clé de performance de la conscience de la situation pour les pilotes. En effet, lors de la conception des interfaces graphiques, l'information avionique doit pouvoir être stockée et être facilement accessible à tout moment. Un pilote aborde ce point : « dans un environnement de points très denses (sur le Navigation Display) quand on nous demande direct un point et qu'il y en a 50 autour, il faut qu'on choisisse le bon et que l'on ne s'y reprenne pas à 4 fois pour trouver le bon ». La performance de la sélectivité de l'information diminue la charge de travail (e.g. double tâches) (Lavie et al. 2004). Le plus haut niveau de performance en matière de sélectivité qualifie une information comme pré-attentive (Treisman 1985), c'est-à-dire qu'elle est accessible visuellement dans un délai inférieur à 250 ms. Cela correspond à une lecture immédiate de l'information.

La seconde raison est la surcharge cognitive associée à la notion de « tunnelage cognitif » (Ververs and May 1998), c'est-à-dire, lorsque l'attention du pilote se fixe sur une information involontairement pour une durée anormale et non contrôlée au détriment d'autres

informations. Le pilote ne parvient plus à passer d'une information à une autre. Il devient surchargé cognitivement. Ce phénomène se produit particulièrement dans les phases critiques (décollage, approche et atterrissage) ou lors de la gestion des pannes comme l'explique ce pilote : « Tu vois par exemple des fois tu peux avoir une panne moteur au décollage [...] et pendant trois minutes tu cherches « putain mon avion, il ne monte pas il ne monte pas » et tu ne comprends pas, tu mets pleins gaz, et tu refais la checklist avant atterrissage et là tu dis, bah « gear down » et là le train (d'atterrissage) il était encore sorti alors que ça fait trois minutes que tu as l'alarme qui gueule. Tu vois la notion du temps tu la perds ». De plus, l'activité de pilotage sollicite régulièrement la gestion de deux tâches pendant le vol. En accord avec la hiérarchie des tâches (cf. 1.1.2.) on parle de tâche principale et de tâche secondaire. Par rapport au tunnelage cognitif, deux cas de figure peuvent intervenir. Dans le premier cas, la répartition des ressources cognitives est équilibrée et le pilote parvient à les réaliser de manière optimale sans tunnelage cognitif. Tandis que dans le second cas, la gestion de la tâche principale est trop complexe et nécessite la mobilisation de la totalité des ressources disponibles par le pilote. De ce fait, la réalisation de la tâche secondaire est soit retardée, soit moins performante (Gopher and Donchin 1986). Pour résoudre ce problème, les pilotes mettent en place des stratégies de gestion d'informations en fonction de leurs priorités pour la sécurité du vol. Ils vont réduire la quantité d'informations à traiter dans le but de ne conserver que les informations essentielles pour construire leur modèle mental de la situation. La hiérarchisation des informations est basée sur la sécurité, en accord avec la structuration des tâches.

En conséquence, par rapport à notre travail de conception, l'information doit, en plus de l'accès rapide ou dit pré-attentif, et de son stockage sur l'interface, être rapidement discriminable afin d'éviter le tunnelage cognitif. Cela nous amène à envisager la construction d'un système de représentation basé sur ces règles de design pour appréhender la suite de notre travail de recherche (cf. chapitre 2).

1.3 CONSCIENCE MUTUELLE

Le poste de pilotage est un environnement partagé entre deux pilotes. La conscience de la situation est propre à chaque pilote. La réussite d'une mission dépend d'une part de la qualité de la conscience de la situation et d'autre part du partage de cette conscience entre les pilotes. Nous définirons d'abord la notion de la conscience mutuelle et nous détaillerons ensuite l'importance du geste dans la construction de celle-ci.

1.3.1 Définition de la conscience mutuelle

La conscience de la situation est relative aux capacités perceptives et cognitives d'un pilote par rapport à sa tâche. Elle lui est essentielle pour la prise de décision. Néanmoins, l'activité de pilotage requiert le croisement des tâches entre deux pilotes dans l'habitacle et les contrôleurs aériens à distance. Ce travail collaboratif développe la nécessité de partager entre tous ces acteurs leurs consciences personnelles. Cette mise en relation s'appelle la

conscience mutuelle². Robert Helmreich (Helmreich and Foushee 2010) a relevé que plus de 70% des accidents entre 1959 et 1989 étaient associés à une mauvaise communication des informations entre les membres de l'équipage. Il cite par exemple le cas d'un équipage, distrait par des communications non opérationnelles, qui n'avait pas rempli les listes de vérifications, et qui s'est écrasé au décollage parce que les volets n'étaient pas sortis ; ou encore le cas d'un équipage qui n'a pas examiné les cartes d'atterrissage, ni utilisé les instruments ou la position de navigation par rapport à l'aéroport, et qui n'a pas tenu compte des alertes répétées du système avertisseur de proximité du sol avant de s'écraser sur une montagne sous l'altitude minimale de descente. En réponse à ce problème, les acteurs de la sécurité aérienne ont développé la gestion des ressources de l'équipage (CRM ou *Crew Resource Management*). La FAA (*Federal Aviation Administration*) définit l'objectif de la CRM comme « la prévention des accidents aériens en améliorant la performance de l'équipage grâce à une meilleure coordination » (Federal Aviation Administration 2004). Les flots procéduraux et des checklists sont issus de la CRM (cf. 1.1.4) ainsi que du développement des procédures de prise conjointe d'évaluation de la situation non-nominale, dites d'aide à la décision (Soll et al. 2016). Nous citerons à titre d'exemple le cas du FORDEC (*Facts, Options, Risks, Decide, Execute, Check*). A chaque point est associée un ensemble de questions permettant d'aider à la prise de décision commune même si, en cas de désaccord, c'est le Commandant de Bord qui décide, du fait de son statut hiérarchique :

- **Facts:** Quel est le problème ?
- **Options:** Quelles sont les options disponibles ?
- **Risks (and Benefits):** Quels sont les avantages et les inconvénients pour chaque option ?
- **Decide:** Qu'est-ce que nous choisissons de faire ?
- **Execute:** Qui fait quoi ? Quand et Comment ?
- **Check:** Est-ce que tout est ok ?

Lors d'un entretien avec un pilote, il nous fait part d'une expérience d'utilisation du FORDEC : « en général quand il y a une décision à prendre on dit « ok on fait un FORDEC ». Ok donc les faits, voilà ce qui se passe, ben par exemple la piste est enneigée, les conditions d'atterrissage là-bas sont POOR, on a demandé une nouvelle météo, a priori ça rouvre dans 20 minutes, là ils nous apportent une nouvelle météo donc on va pouvoir voir ce qui se passe. Les options, qu'est-ce qui se passe ? Ben soit on part, soit, on ne part pas... tout simplement ! Les risques associés : si on part ben c'est une

² Nous avons choisi le terme « conscience mutuelle » (*mutual awareness*) puisqu'il est utilisé dans le domaine de l'aéronautique (Stanton et al. 2017) cependant il est possible de trouver de nombreux synonymes à l'adjectif mutuel à travers les littératures : *workspace awareness, general awareness, peripheral awareness, background awareness, collaboration awareness, passive awareness, reciprocal awareness, etc.*

dégradation de la météo, est-ce qu'on prend un dégagement plus éloigné où il fait beau ? Est-ce qu'on prend plus de pétrole pour attendre ? Si on ne part pas ben les risques... il n'y a pas de risque, le risque c'est commercial mais nous ce n'est pas vraiment notre problème. On passe à l'exécution, donc là je lui propose : ben écoute ce que je te propose c'est qu'on prenne un dégagement où il fait très beau où il n'y a pas de neige et on prend en plus une heure d'attente ». L'usage de ce type d'outil d'aide à la décision utilise l'énonciation orale pour assurer le partage des informations entre les consciences de la situation propres aux deux pilotes. Pour mesurer la qualité d'une conscience mutuelle, Neville Stanton (Stanton et al. 2017) considère que les deux pilotes (PF et PM) doivent être « tous deux en mesure de comprendre le comportement de l'autre pilote et ses motifs, lorsqu'ils doivent faire face à une situation d'urgence en vol ». Kjeld Schmidt (Schmidt 2002) propose une définition détaillée des critères permettant d'atteindre cette efficacité (nous la citons dans sa totalité) :

« 'Awareness' is not the product of passively acquired 'information' but is a characterization of some highly active and highly skilled practices. Competent practitioners are able to align and integrate their activities because they know the setting, they are not acting in abstract space but in a material environment which is infinitely rich in cues. They understand the processes and the issues, they know how activities intersect, they know what probably will happen and what might happen, they expect things to happen and other things not to happen, they anticipate what will happen next, they are in the rhythm, they monitor for indicators of what is expected to happen, and so on. They know the procedures, the rules, the naming conventions, the schedule. In short, they are not struggling to make sense but in the middle of things, doing what they do every day; they know the drill. Occurrences beyond their immediate line of action is seen, made sense of, and understood against this background. » (Schmidt 2002, 292)

Pour assurer la fluidité dans la compréhension de l'autre, la parole et le comportement gestuel sont des moyens très efficaces (Hutchins and Nomura 2011). Compte tenu du problème à l'origine de ce travail de recherche, nous focaliserons notre étude sur la description du comportement gestuel puisque c'est lui qui est principalement mis en cause par le changement de paradigme entre l'interaction sur des contrôleurs physiques et l'interaction tactile sur des écrans.

1.3.2 L'importance des gestes

La réalisation des gestes, comme leurs perceptions par l'équipage, participe pleinement à l'élaboration de la conscience mutuelle. Dans leur analyse sur les comportements gestuels des commissaires-priseurs et des acheteurs dans les salles des ventes aux enchères, Christian Heath et Paul Luff (C. C. Heath and Luff 2011) montrent l'importance des gestes dans la construction d'une organisation collaborative. L'étude montre que la perception des gestes, en juxtaposition de la parole, est utile pour assurer une coordination entre les interlocuteurs. Les gestes apportent aux paroles des notions de temporalité et de rythme : « The gesture that accompanies the voicing of the increment "two

three two" embodies two distinct actions. The first invites the participant to accept the increment, the second – the flip of the hand, up and down, as the gesture begins to withdraw – acknowledges the bid as it is produced. The gesture is shaped with regard to the concurrent contribution of the principal recipient and in particular his rapid acceptance of the next increment » (C. C. Heath and Luff 2011). Du fait de la séparation des tâches pour assurer la mission de vol, les pilotes doivent coordonner temporellement leurs gestes afin de pouvoir se synchroniser lors des moments de contrôle partagé (cf. 1.1.4). L'analyse de l'activité des pilotes menée par Edwin Hutchins et Saeko Nomura (Hutchins and Nomura 2011) fait état de la complémentarité des gestes et de la parole pour assurer à la fois la conscience de la situation et la conscience mutuelle : « Gesture, talk, printed words and material objects all have different representational affordances. Imagining an activity by simultaneously talking and gesturing about it produces a richer representation than is produced by either talk or gesture alone » (Hutchins and Nomura 2011). L'étude indique que la perception de la singularité des comportements gestuels apporte des détails importants sur la signification des actions : « What is meaningful and what is not, what should be attended to and what should be disregarded as noise, depends on how the gesture is construed » (Hutchins and Nomura 2011). Tandis que la parole annonce l'action, le geste est un indicateur permettant d'avoir une conscience de « comment » l'action est réalisée. Par ailleurs, les pilotes utilisent les gestes pour construire leurs discours, par exemples lors des procédures de prise de décision (cf. 1.3.1) ou durant des formations pour indiquer le déroulement des séquences gestuelles à réaliser. Afin d'approfondir nos connaissances sur l'importance des gestes dans le travail collaboratif, nous présenterons plus tard dans ce manuscrit (cf. 2.3) une analyse détaillée d'après nos propres observations avec des pilotes professionnels.

1.4 VERS UNE IMPLEMENTATION DES SURFACES TACTILES

L'intégration des surfaces tactiles (écrans tactiles) comme nouveau paradigme d'interaction pose de nombreuses questions en matière de sécurité pour la performance de la mission de vol. En effet, bien qu'elles soient présentées comme plus efficaces et adaptées aux besoins actuels des afficheurs par la littérature spécialisée, l'efficacité de leurs interactions pour la conscience de la situation et la conscience mutuelle des pilotes reste encore limitée. Nous commencerons par décrire son implémentation en décrivant l'évolution des postes de travail des pilotes. Puis, nous aborderons les avantages et les enjeux des surfaces tactiles. Enfin, nous introduirons le problème de la perception des interactions tactiles de l'autre, auquel notre travail de recherche proposera une réponse.

1.4.1 Évolution des interfaces avioniques

L'évolution technologique des surfaces avioniques (*flight decks*) des postes de pilotage est composée de quatre générations majeures (Jacobsen, Graeber, and Wiedemann 2010; Lim et al. 2018) : *classic flight decks* (1960), *glass cockpits* de 1^{ère} (1980) puis de 2^{ème} génération (1990), *interactive cockpits* (2005).

Classic flight decks

Dans les postes de pilotage classiques, chaque fonction avionique est accessible directement soit par des actionneurs électromécaniques (sélecteurs, tirettes, manettes, leviers, pédaliers) soit par des afficheurs graphiques, également appelés, instruments de bord analogiques (cadrans, jauges, voyants). L'information est analogique parce qu'elle résulte d'un phénomène physique et qu'il n'y a pas de transformation digitale. L'automatisation des systèmes y est très pauvre. C'est pourquoi l'équipage pour assurer la mission de vol nécessite cinq membres : commandant de bord et premier officier au pilotage, officier mécanicien, opérateur de la navigation et opérateur de la radiotéléphonie). La grande quantité des informations et des instruments de bord oblige à recouvrir toutes les parois des postes de pilotage du Concorde (cf. Figure 12). Cette quantité d'informations rend l'activité de pilotage complexe par rapport à la conscience de la situation parce qu'elle oblige un balayage de contrôle très important en matière de ressource cognitive. De plus, la mise en partage des informations est complexe compte tenu du nombre important de pilotes spécialisés (jusqu'à cinq, cf. 1.1.1).



Figure 12. Poste de pilotage du Concorde, premier vol 1969.

1^{ère} génération des glass cockpits

L'information analogique devient digitale grâce à l'intégration des puces informatiques dans les systèmes avioniques. Cette avancée permet d'une part, la centralisation des informations et des fonctions affichées sur des écrans à tubes cathodiques et d'autre part, une amélioration des automatisations des systèmes. Dans l'habitacle, cela

se traduit par une diminution³ des cadrans et des jauges. Par exemple, les informations de contrôle de l'avion comme la vitesse (*Airspeed Indicator*), le tangage et le roulis (*Attitude Indicator*), l'indicateur de virage (*Turn and Slip Indicator*), l'altitude (*Altimeter*) le cap (*Heading Indicator*) et la vitesse verticale (*Vertical Speed Indicator*) sont réunis sur un seul écran cathodique : le système électronique d'indicateur directionnel (EADI ou *Electronic Attitude Directional Indicator*). Même constat pour les instruments relatifs à la navigation (e.g. *Magnetic Compass*, *Course Deviation Indicator*, *Radio Magnetic Indicator*, *Heading Indicator*, etc.) avec l'apparition du système électronique d'indicateur d'horizon (EHSI ou *Electronic Horizon Situation Indicator*). Le principal avantage de cette centralisation pour les pilotes est la réduction spatiale du balayage de contrôle. De plus, le poste de pilotage intègre de nouvelles fonctionnalités, comme par exemple le système d'évitement des collisions (TCAS ou *Traffic Collision Avoidance Systems*) qui alarme les pilotes lorsqu'il y a un risque de collision avec un autre avion ; le système de gestion du vol (FMS ou *Flight Management System*) intégré au boîtier physique du MCDU (*Multipurpose Control and Display Unit*) qui permet de « calculer les performances, la prévision de la trajectoire, la planification et l'optimisation des vols, ainsi que le guidage vertical et latéral » (Lim et al. 2018) ; la surveillance d'alerte des systèmes pour l'équipage (CAS ou *Crew Alerting Systems*) qui centralise les informations des systèmes avioniques pour la surveillance et indique sous forme de page les informations propres à chaque système (cf. Figure 13), les alarmes et les procédures à réaliser (*read-and-do lists*) en cas de situation anormales. Le CAS est affiché sur un écran cathodique (ECAM ou *Electronic Centralised Aircraft Monitor* pour Airbus et EICAS ou *Engine-Indicating and Crew-Alerting System* pour Boeing). L'évolution technologique de ce type de poste de pilotage (e.g. intégré à l'A310, 1982, cf. Figure 13) a permis de réduire à deux le nombre de pilotes nécessaires à la mission de vol (Commandant de bord et premier officier, cf. 1.1.1).



Figure 13. A gauche, le poste de pilotage de l'A310, premier vol 1982. A droite, détail sur son ECAM.

³ On parle de diminution et non de suppression pour des raisons de redondance requises pour la certification des postes de pilotage.

2^{ème} génération des glass cockpits

Dans la continuité des intentions de conception en matière de synthèse visuelle des informations de la première génération, une seconde génération de glass cockpits apparaît au début des années 1990 avec des avions comme le B747-400 ou l'A320 (cf. Figure 14). L'ensemble des systèmes d'affichages électroniques (regroupé sous le terme EFIS ou *Electronic Flight Instrument System*) se développe vers davantage d'automatismes et augmente pour chaque système la concentration des fonctions associées. Cette « proximité spatiale » des informations permet de réduire la charge de travail pour accéder à l'information avec des zones de balayages de contrôle moins étendues (Wickens and Carswell 1995). Cela se traduit par exemple avec le système d'évitement des collisions (TCAS) qui est intégré directement d'une part dans le *Primary Flight Display* (PFD) qui remplace le système électronique d'indicateur directionnel (EADI) et d'autre part dans le *Navigation Display* (ND) qui hérite du système électronique d'indicateur d'horizon (EHSI). Autre point, les pilotes peuvent désormais utiliser des sacsches de vols électroniques (EFB ou *Electronic Flight Bag*). Ce dispositif est une surface tactile d'aide à la gestion du vol. Il affiche des informations techniques comme le manuel d'exploitation de l'avion, des documents de performance requis par la compagnie commerciale, des cartes météorologiques ou encore des cartes de navigations (e.g. terrains d'atterrissages). L'objectif de cet outil est de réduire la quantité de papier dans le poste de pilotage. En ce qui concerne les actionneurs, l'avionneur Airbus poursuit l'amélioration engagée avec la 1^{ère} génération des glass cockpits, avec la disposition des contrôleurs physiques sur le panneau en tête haute (Overhead panel, cf. Figure 14) dans le but de permettre une meilleure performance des balayages de contrôle par les pilotes. Les actionneurs sont regroupés spatialement par système et ils sont positionnés pour montrer les rapports de causalité avec chaque fonction. Plus la fonction à actionner est éloignée du corps et plus elle est considérée comme critique et irréversible. Par exemple, les trois fonctions d'isolations des moteurs sont placées dans la partie la plus haute de la rangée du milieu alors que les fonctions bénignes comme le déclenchement des lumières de position extérieures sont situées dans la partie la plus basse de la rangée du milieu.



Figure 14. A gauche, le panneau en tête haute de l'A310 (1^{ère} génération de glass cockpit). A droite, celui de l'A320 (2^{ème} génération de glass cockpit).

Interactive cockpits



Figure 15. Poste de pilotage de l'A380, premier vol 2006.

La conception de l'A380 (cf. Figure 15) est à l'origine d'une nouvelle génération d'interface avionique appelée Interactive cockpit. Les écrans à tubes cathodiques de l'EFIS sont remplacés par des écrans à cristaux liquides (LCD) moins épais et plus économes en énergie. Ces écrans deviennent multifonctions (MFD ou *Multi-Functions Displays*). En effet, ils sont équipés d'interfaces à fenêtre statique de type WIMP (*Windows, Icons, Menus and Pointing device*) et contrôlables manuellement depuis un périphérique à commande multiple, le KCCU (*Keyboard Cursor Control Unit*) qui remplace le MCDU. Les pilotes peuvent entrer et modifier des valeurs directement sur les pages des systèmes avioniques. L'AECC (*Airlines Electronic Engineering Committee*) qui regroupe les principaux avionneurs et équipementiers internationaux comme Airbus, Boeing, Thalès ou encore Rockwell Collins, a mis en place le standard ARINC661 pour les interfaces graphiques (GUI). Il normalise d'une part la définition d'un système d'affichage graphique (composants graphique ou widgets et structure de l'arbre) en produisant un fichier de définition binaire (DF ou *definition file*) instancié à l'initialisation (cf. Figure 16). Ce système d'affichage est appelé CDS (*Control and Display System*). D'autre part, il définit la communication entre le CDS et les applications utilisateurs (UA ou *User Applications*) comme par exemple le FMS ou l'EFB.

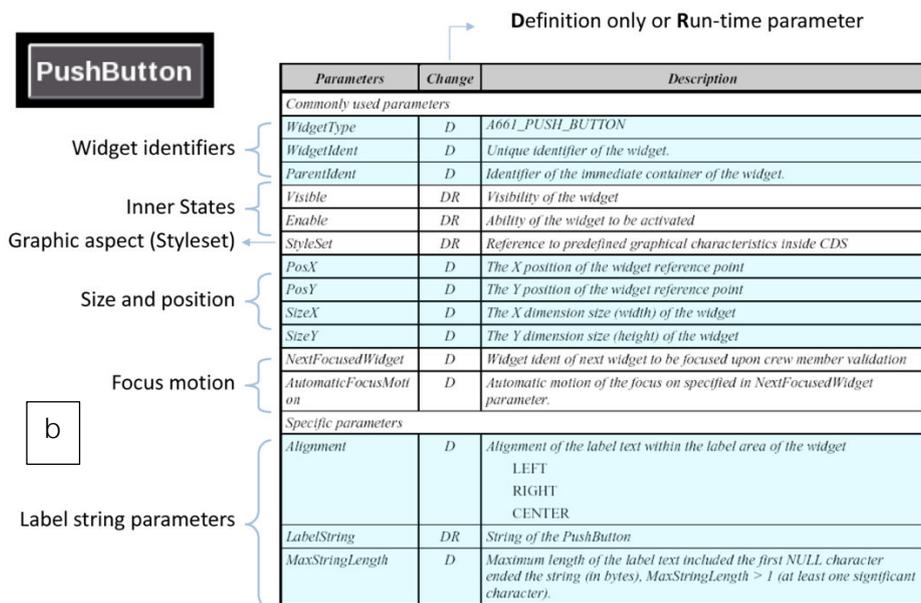
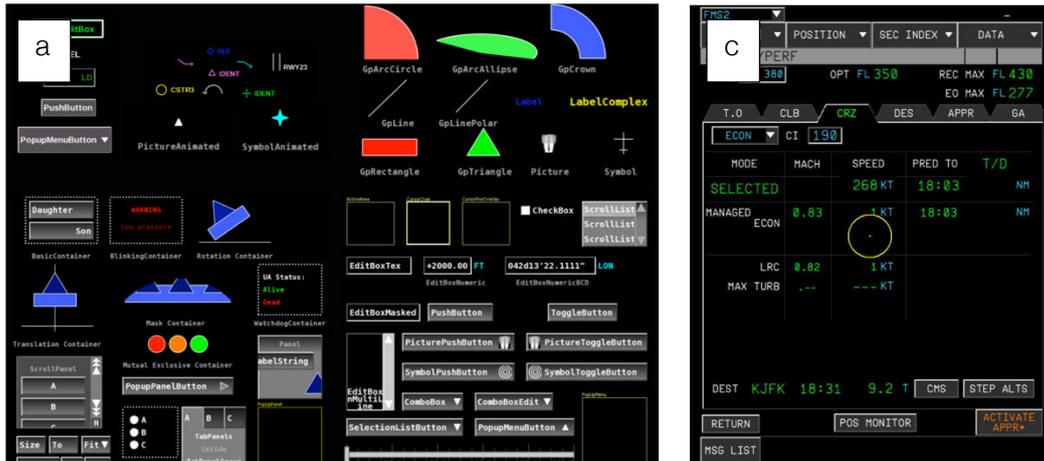


Figure 16. a) composants graphiques (widgets), b) exemple de structure d'un arbre (ici pushbutton), c) interface perçue par le pilote sur un MFD.

1.4.2 Surfaces tactiles, avantages et limites

L'implémentation des MFD pour l'EFIS a ouvert le champ à de nombreux projets innovants basés sur le dynamisme des informations en temps réel, l'adaptabilité des affichages en fonction des situations de vol et la continuité des interfaces sans bordures physiques. Pour contrôler ces interfaces, deux modalités sont majoritairement utilisées : l'interaction traditionnelle par contrôleur physique et l'interaction tactile. En effet, l'utilisation de cette dernière est sollicitée à la fois pour améliorer l'activité de pilotage (e.g. interaction directe, utilisabilité et flexibilité) mais également pour réduire les coûts des acteurs économiques de l'aéronautique (e.g. réduction en quantité de câblage, économie de maintenance, poids de l'appareil, adaptation des interfaces par rapport à la qualification du pilote donc réduction de coût de formation pour les compagnies aériennes). Néanmoins, sa mise en œuvre est complexe pour le poste de pilotage d'un avion de ligne. D'abord parce que c'est un environnement instable du fait des turbulences et que l'interaction tactile

par définition supprime le maniement d'objets physiques auxquels se raccrocher. Ensuite, l'interaction tactile est moins précise et produit plus d'erreurs que l'interaction sur des contrôleurs physiques. Enfin, l'interaction est moins perceptible par l'équipage ce qui amoindrit la conscience mutuelle. Nous allons à présent aborder successivement ces points en commençant par une description des systèmes de réalité augmentée SVS/EVS/CSV.

Les systèmes de réalité augmentée SVS/EVS/CSV



Figure 17. Synthetic Vision System de la série Primus Epic développé par Honeywell Aerospace et Dassault Aviation System, certifié en 2011 par la FAA pour le Falcon 900LX, un avion d'affaire à deux pilotes.

Les projets de réalité augmentée de Synthetic/Enhanced/Combined Vision Systems (SVS/EVS/CSV) (RTCA 2011) visent d'une part à apporter visuellement un enrichissement de l'environnement extérieur avec des informations sur les reliefs, les obstacles fixes et dynamiques et les points d'intérêts (e.g. waypoints, pistes d'aéroports) et d'autre part à centraliser les informations sur un même écran afin de suivre le principe de proximité spatiale permettant de réduire le coût cognitif d'accès à l'information (Wickens and Carswell 1995) (cf. Figure 17). La distinction entre le SVS et l'EVS est d'ordre technologique. Le SVS génère la scène en faisant converger d'une part des données de navigation (e.g. position, altitude) produites par les systèmes avioniques de l'avion, d'autre part des données sur les spécificités des terrains (e.g. reliefs, obstacles) provenant d'une base de données embarquée. L'EVS utilise des capteurs externes d'imageries installés sur l'avion (e.g. radar à infrarouge, radar à ondes millimétriques) pour construire une image augmentée en temps réel. Le CSV est une combinaison du SVS et de l'EVS. En matière de performance

d'informations avioniques, le SVS est restreint par l'exactitude de ces données puisqu'elles ne sont pas déterminées en temps réel comme l'EVS. Néanmoins ce dernier est soumis à la précision des capteurs et à leurs états de fonctionnement (Lim et al. 2018). La principale limite pour l'utilisation de ces systèmes d'affichages concerne la notion d'encombrement visuel puisqu'une trop grande quantité d'informations concentrées au même endroit rend plus lourde la charge de travail pour accéder à l'information (Doyon-Poulin, Ouellette, and Robert 2014).

Continuité des écrans, vers une interface unique et tactile



Figure 18. Rangée du haut, Symmetrie Flight Deck par Gulfstream basé sur la série Primus Epic de Honeywell, certifié en 2014 par la FAA pour le Gulfstream G500, un avion d'affaire à deux pilotes (à gauche, une vue d'ensemble ; au milieu, détail sur les rebords pour saisir la surface ; à droite, une commande de contrôle physique des MFD). Rangée du bas, Pro Line Fusion par Rockwell Collins, certifié en 2014 par la FAA pour le Legacy 500, un avion d'affaire à deux pilotes.

Pour afficher puis contrôler les systèmes SVS/EVS/CSV, et plus largement l'ensemble des applications avioniques composant l'EFIS, les industriels (e.g. Thalès Avionics, Rockwell Collins) proposent deux types d'interfaces avioniques. Il y a celles motivées par des enjeux commerciaux à court terme et celles associées à des projets de recherche sur le long terme. Afin d'assurer la phase de certification, les premières permettent la double modalité d'interaction (contrôle d'une information par interacteur physique ou par interaction tactile). C'est par exemple le cas avec le *Pro Line Fusion* développé par Rockwell Collins (cf. Figure

18) ou le *Symmetry Flight Deck* conçu par Gulfstream à partir des technologies de la série *Primus Epic* proposé par Honeywell (cf. Figure 18)⁴. Les MFD utilisent des écrans résistifs. Ce type d'écran est composé d'une superposition de deux feuilles flexibles, transparentes et aux axes croisés (x et y). Lorsqu'elles se touchent sous la pression d'un doigt, cela génère un contact avec une information de position qui peut être utilisée pour produire une interaction numérique. Enfin, les bords physiques des écrans sont accentués pour permettre leurs saisies afin d'améliorer le contrôle gestuel particulièrement lors de turbulences.



Figure 19. A gauche, ODICIS, 2011. A droite, Avionics 2020 par Thalès Avionics, 2014.

Les interfaces avioniques du deuxième type sont des concepts de design où la surface tactile recouvre totalement l'EFIS et remplace complètement les contrôleurs physiques. C'est par exemple le cas avec des projets comme le *One Display for a Cockpit Interactive Solution* (ODICIS) mené par un consortium européen dirigé par Thalès Avionics (Zammit Mangion et al. 2011; Alapetite and Fogh 2012) (cf. Figure 19) ou le cockpit d'Avionics 2020 de Thalès Avionics présenté au salon du Bourget en 2014 (cf. Figure 19). Pour utiliser ces surfaces les pilotes utilisent presque exclusivement des interactions tactiles (sauf manette des gaz). Les pilotes peuvent agencer les applications avioniques comme ils le souhaitent en fonction de leurs besoins et de leurs rôles. Bien que ces projets n'aient pas vocation à être certifiés en l'état, ils permettent à la communauté aéronautique d'envisager le cockpit du futur. Nous allons à présent décrire les avantages et les inconvénients de l'utilisation des surfaces tactiles.

⁴ Le premier appareil de l'aviation de ligne à intégrer un *flight deck* entièrement hybride (contrôleurs physiques et interactions tactiles) devrait être le 777X avec le Pro Ligne Fusion de Rockwell Collins (déjà certifié par la FAA depuis 2014 sur des avions d'affaires). Il devrait entrer dans sa phase de certification au début de l'année 2020.

Avantages des interactions sur des surfaces tactiles

L'intégration des surfaces tactiles est motivée par de multiples raisons à la fois pour les pilotes mais également pour les avionneurs et les compagnies aériennes. D'abord, les interfaces tactiles permettent d'afficher toutes les informations, associées directement ou indirectement à un système, sur une même zone d'un écran (Bonelli and Napoletano 2013) (cf. Figure 20).



Figure 20. Détail d'une interaction sur le prototype Avionic 2020 par Thalès Avionics, 2014.

De ce fait, cela réduit le délai de recherche pour accéder visuellement à l'information et allège l'effort cognitif à fournir (Albinsson and Zhai 2003). L'étude de Denise Jones (Jones 1990) montre que l'interaction tactile est plus performante que la reconnaissance vocale ou l'utilisation d'un pointeur physique (*trackball*) en termes de délai pour gérer des tâches spécifiques comme traiter des messages d'alerte pour l'équipage ou naviguer dans les menus des sous-systèmes. Elle montre également que la fatigue musculaire est réduite parce que les mouvements s'opèrent sur des espaces restreints. Les pilotes apprécient la disposition des menus le long des bords physiques des écrans parce qu'ils peuvent les saisir et interagir avec le pouce (Avsar, Fischer, and Rodden 2016). Par ailleurs, l'interaction tactile permet le principe d'interaction directe, c'est-à-dire le fait d'accéder à l'information en désignant directement sa représentation graphique. L'interaction directe rend l'interaction tactile plus rapide que l'interaction par la manipulation d'un contrôleur physique (clavier physique ou virtuel) (Avsar, Fischer, and Rodden 2016). Du point de vue des industriels, le développement des interfaces tactiles permet de réduire la quantité de câbles dans les avions (poids et coût), d'améliorer l'image mercatique par rapport à la notion d'innovation, de faciliter la maintenance des postes de pilotage (réductions des contrôleurs physiques) et de standardiser les produits (Lorenzo-Del-Catillo and Couture 2016).

Limites et risques

Malgré ses avantages, l'interaction tactile présente des limites et des risques en matière de sécurité pour la mission de vol par rapport à l'interaction par la manipulation d'un contrôleur physique. Nous avons identifié quatre principales limites : la performance de l'interaction (taux d'erreur, temps plus long pour certaines tâches), une attention visuelle indispensable, une perte de sensation tactilo-kinesthésique et une diminution de la conscience de la situation. Nous présentons ici les trois premières limites (la quatrième dans la section suivante) avec des méthodes ou solutions associées.

Performance de l'interaction (taux d'erreur)

Malgré l'intérêt de l'interaction directe, il apparaît que l'interaction tactile est sensible à la sélection accidentelle et non désirée (Asaf Degani, Palmer, and Bauersfeld 1992) notamment à cause des turbulences et du manque de rétroaction (Kaminani 2011; Dodd et al. 2014). En effet, l'augmentation de la force G (+Gz) a un impact incrémental sur la qualité de l'interaction. L'étude de Le Pape (Le Pape and Vatrappu 2009) montre que la différence de délai d'action pour effectuer des tâches de sélection dans un avion de voltige est de 20% entre +1-Gz et +3-Gz (vers le bas, sang vers la tête). Autre constat, le réglage d'une valeur continue est moins précis et requiert un délai plus long de 20% que l'interaction par manipulation d'un objet physique (contrôleur rotatif) (Voelker et al. 2015). En effet, l'absence de contrainte physique (bords, guides) pour reposer la main est un facteur important dans la qualité du geste sur une surface tactile (Lucchi et al. 2010; Barbé, Mollard, and Wolff 2014). Plusieurs méthodes ont néanmoins été conçues pour résoudre ces problèmes : la solution par une conception logicielle comme l'annulation de la sélection suite à la détection des vibrations grâce à la taille de l'empreinte (Kolbe 2013), par l'apparition d'une fenêtre de confirmation suite à des secousses (Williams et al. 2014) ou par la représentation des trajectoires possibles par anticipation (Mott and Wobbrock 2014). Enfin, par la forme des gestes en proposant la création d'un vocabulaire de gestes (Rekimoto 2002). Cependant « l'augmentation de l'expressivité du vocabulaire gestuel augmente également le risque pour le logiciel de mal interpréter l'intention de l'utilisateur » (A. Cockburn et al. 2019). De plus, le poste de pilotage est un environnement en mouvement, comprenant des secousses plus ou moins fortes selon les vagues de turbulences. Les formes de geste impliquant du mouvement comme le *swipe*, *drag and drop* ou le zoom sont à éviter. En effet, dans son étude sur la conception d'un geste robuste en condition de turbulence, Andy Cockburn considère que « dans un réglage critique pour la sécurité l'action de *drag and drop* pourrait représenter un mouvement involontaire hors de la cible souhaitée » et générer une erreur de sélection (A. Cockburn et al. 2019)⁵.

⁵ Dans la mesure où nous avons adopté la proposition d'Andy Cockburn pour concevoir notre interaction tactile, nous la présenterons au chapitre 7.

Attention visuelle indispensable



Figure 21. Au cours d'un entretien, un pilote présente l'importance de l'inclinaison des contrôleurs physiques pour la conscience de la situation.

La présence des contrôleurs physiques est très appréciée des pilotes pour la surveillance des systèmes puisqu'ils peuvent externaliser leur mémoire (cf. 1.2.4.) comme le déclare ce pilote : « Je vois quand ils sont faits. Ça se voit en fait. En fait sur Boeing, sur 37 (B737) les boutons c'est des gros switches et quand tu es en place gauche, les switches tu les vois dans une certaine position (représente l'inclinaison des switches par l'orientation de sa main) et quand tu regardes les boutons de profils, tu vois s'ils sont bien configurés ou pas. Donc c'est fou hein, en fait tu cherches une image quoi en fait, et quand tu vois que l'image est là bah c'est bon. Tu ne sais même pas comment s'appelle les boutons quoi en fait, enfin si... tu les connais, mais pour toi c'est un tout quoi » (cf. Figure 21). La forme de l'objet (avec son inclinaison, sa position, sa taille, sa matière, son état) est un médium important d'information. Le regard peut se poser sur des surfaces et en déduire des comportements d'utilisations (e.g. le concept d'affordance) ou d'états. A l'inverse, les surfaces tactiles, dénuées de reliefs, contraignent les pilotes à augmenter leurs vigilances lors de l'interaction comme le mentionne ce pilote « les boutons tactiles c'est un problème uniquement parce que ça bouge : Je suis obligé de regarder le doigt, parce que dès que je pose mon doigt, il se passe quelque chose, quoi. » mais également lors de la surveillance « les éléments tactiles prennent plus de temps dans le circuit. J'ai intérêt à faire attention, voire prendre appui, bien regarder... Et pendant tout ce temps-là je ne peux pas balayer ». Ce phénomène est accentué avec les turbulences. L'étude de Hong (Hong et al. 2011) montre que le déplacement involontaire de la main sur les écrans tactiles dans les véhicules terrestres en situation de fortes vibrations provoque un masquage des informations et diminue la rapidité des interactions. L'accès aux informations dans ces conditions contraint les pilotes à entretenir une grande concentration en matière de contrôle, ce qui augmente la charge cognitive (Noy et al. 2004; Buxton, Hill, and Rowley 1985; Tory and Kincaid 2013). Le niveau de charge dépend de la qualité de lisibilité de la visualisation des informations due aux turbulences de l'appareil, à la taille des typographies et des objets graphiques (Large et al. 2015). De plus, comme nous l'avons précédemment mentionné avec l'introduction

des SVS/EVS/CSV, une trop grande quantité d'informations concentrées au même endroit produit un encombrement visuel et augmente la charge de travail (Doyon-Poulin, Ouellette, and Robert 2014).

De notre point de vue, la complexité des interfaces tactiles avioniques réside dans la performance du système graphique, sa composition et l'optimisation des objets graphiques. L'enjeu est de rendre accessible l'information le plus rapidement possible. D'être un système pré-attentif, c'est-à-dire où l'information est accessible presque immédiatement (>250 ms). Nous présenterons des propositions de solution associées à ce problème au chapitre 4.

Perte de sensation tactilo-kinesthésique

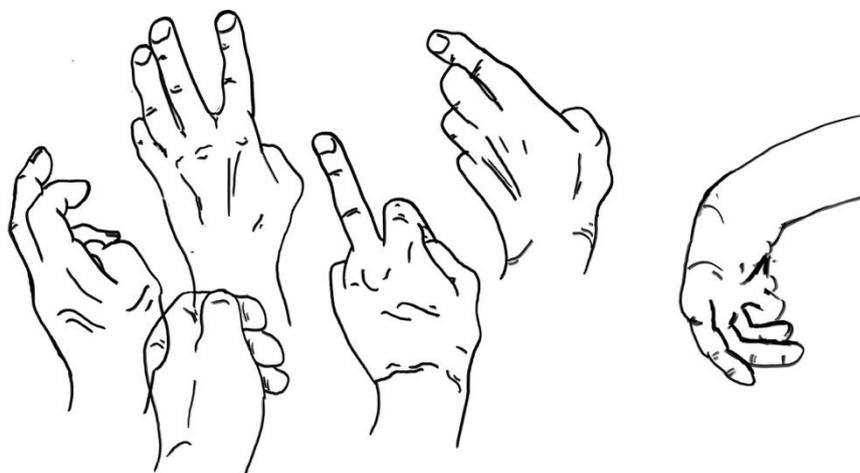


Figure 22. Croquis dessinés pendant les phases d'observations de l'activité gestuelle des pilotes, représentant plusieurs postures des mains en train de manipuler des contrôleurs physiques.

En cohérence avec les deux points précédents, la dématérialisation des interfaces physiques par des surfaces lisses et plates rend les interactions plus difficiles à utiliser. Beaucoup d'études ont comparé l'interaction tactile avec des interactions produites par la manipulation d'objet tangibles (e.g. souris, clavier, trackball, manche) dans des situations de turbulence. Elles montrent que la turbulence réduit davantage la performance de l'interaction sur surface tactile par rapport à l'interaction par manipulation d'un objet tangible (Lin et al. 2010; Baldus and Patterson 2008; Ahmad et al. 2015). L'interface tactile réduit la fonction tactilo-kinesthésique (également appelée haptique) des mains puisqu'elles n'utilisent plus que les extrémités des doigts, ce qui est très perturbant pour l'activité de pilotage. Ce pilote explique l'importance du sens du toucher : « avec les yeux, ça ne suffira pas, parce qu'en fait on touche, quand on passe sur les manettes on vérifie qu'elles sont bien là et ici que c'est bien fermé, que tous les interrupteurs, que tous les boutons poussoirs sont bien en place et pareil ça va être là-haut (*Overhead Panel*) on va toucher » (cf. Figure 22). De plus, la main et le bras ne se reposent plus sur un objet physique, ce qui génère à force de répétition de la fatigue musculaire selon la disposition (et l'inclinaison) de l'écran (Barbé, Wolff, and Mollard 2013).

1.4.3 Enjeux pour la conscience mutuelle

L'interaction sur surface tactile soulève la problématique de la perception du geste par l'équipage. C'est sur ce point que nous avons décidé d'axer notre travail de recherche. L'interaction par la manipulation d'un objet physique conduit le geste à se déplacer dans l'espace et dans le temps avec une attitude spécifique (e.g. fluidité, lenteur). Nous avons vu que l'agencement des objets physiques et des informations affichées (fixes) est une clé de conception bénéfique à la conscience de la situation et à la conscience mutuelle. Elle permet d'une part d'externaliser la mémoire de travail pour libérer de la ressource cognitive à la gestion d'autres tâches, et d'autre part d'être accessible visuellement par l'ensemble de l'équipage (Hutchins 1994). Même si chaque information, qu'elle soit affichée sur un écran, transmise oralement ou tactilement accessible, est interprétée de façon différente par les membres d'équipage en fonction de leurs rôles et de leurs objectifs (Stanton et al. 2017), il apparaît que l'objectif de la conscience mutuelle est d'établir une conscience de l'autre sur son comportement, ses intentions et son état physique et psychologique afin de pouvoir coordonner les actions des deux pilotes. Les deux pilotes doivent comprendre l'interprétation de l'information par l'autre afin de reprendre « la main » de l'autre en cas de problème. Cependant, les interactions sur des surfaces tactiles sont moins perceptibles et compréhensibles que celles sur des objets physiques (Speelpenning et al. 2011; Eckstein 2019; Brave, Ishii, and Dahley 1998; Cohen and McGee 2004)(Speelpenning et al. 2011; Brave, Ishii, and Dahley 1998; Cohen and McGee 2004) du fait du dynamisme des affichages, de l'encombrement visuel, et de la perte de repère physique (spatiale, matérialité et affordance des objets).

Au regard de ces éléments nous proposons d'engager notre travail de recherche sur la mise en place d'une solution visant à suppléer les gestes numériques produits sur ces interfaces tactiles. L'objectif de cette suppléance est d'assurer une bonne qualité de conscience mutuelle pour la sécurité d'un vol, tel qu'elle existe dans les interactions avec des contrôleurs physiques.

1.5 CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de comprendre l'activité de pilotage d'un avion de ligne dans le but de spécifier la genèse de l'objectif principal de notre recherche. Nous avons décrit les tâches et les méthodes employées par les pilotes pour assurer leur complétude. La réalisation de ces méthodes est tributaire de deux principaux facteurs : la qualité de la conscience de la situation et la qualité de la conscience mutuelle. Nous les avons présentées d'après des études spécifiques à l'activité des pilotes. Nous avons également présenté le rôle du geste dans la construction du travail collaboratif. Nous avons présenté un état de l'art sur l'évolution des postes de pilotage jusqu'à l'intégration des surfaces tactiles en spécifiant ses qualités et ses inconvénients par rapport à la conscience de la situation et à la conscience mutuelle. Enfin, au terme de l'ensemble de ce chapitre, nous avons spécifié l'objectif de notre travail concernant le problème de la perception des gestes par l'équipage, par rapport aux contraintes des interactions tactiles.

2 COMPRENDRE LES GESTES

« A terme le savoir l'emporte sur le voir »

(Arasse 1992)

L'enjeu de ce travail de thèse par rapport à l'activité aéronautique est le suivant. Dès lors qu'il y a des interactions sur des surfaces tactiles dans le cadre d'un travail collaboratif, et compte tenu de la séparation des tâches dans l'activité de pilotage, nous proposons, pour assurer la performance d'une conscience mutuelle (CM), de mettre en place un artefact de suppléance dont l'utilité sera de transmettre des informations sur les comportements gestuels des pilotes. Sans entrer dans le détail, puisqu'il fera l'objet du prochain chapitre (cf. chapitre 3), nous précisons dès à présent notre choix de conception de système de représentation afin de clarifier nos intentions. Nous proposons d'utiliser une représentation iconique basée sur la visualisation graphique. Notre objectif est de produire des affichages visuels pré-attentifs qui soient adaptés aux besoins opérationnels de l'activité de pilotage. Pour les concevoir nous devons d'une part, déterminer les informations produites par les gestes techniques des pilotes sur les surfaces avioniques, et d'autre part, évaluer la conscience que les deux pilotes ont l'un de l'autre pour assurer avec sécurité l'accomplissement des tâches. L'objectif de ce chapitre est d'apporter, d'après la littérature scientifique et d'après nos propres observations des comportements gestuels des pilotes, des éléments de réponse à la question de recherche :

Quelles sont les dimensions (informations critiques) constitutives des gestes qui participent à la conscience mutuelle ?

Pour pouvoir identifier et distinguer les dimensions utiles à la conscience mutuelle vis-à-vis des autres dimensions, nous sommes confrontés à la question de la définition du geste. Nous focaliserons notre étude sur les gestes techniques, en excluant la gesticulation (c'est-à-dire les gestes produits inconsciemment) afin de restreindre la complexité de la question :

De quoi est composé un geste technique ?

Nous proposons d'aborder ce problème d'une grande richesse d'investigation en introduisant peu à peu la méthode que nous suivrons pour y répondre. En tant que designer formé aux arts appliqués, je me suis inspiré du travail sur la compréhension des œuvres picturales proposé par l'historien de l'art Daniel Arasse (Arasse 1992). Ce dernier présente des clés de compréhension pour « savoir lire » des tableaux de maîtres produits entre le XV^{ème} siècle et le XX^{ème} siècle. L'historien d'art expose l'importance des détails. Il les décrit comme des traces intentionnelles et non-intentionnelles à la double signification : à la fois en tant qu'élément visible et participant au message de l'œuvre (*particolare*) mais également en tant que trace évocatrice du comportement gestuel de son géniteur (*dettaglio*), c'est-à-dire « celui qui fait le détail » (Arasse 1992, 12) à la fois dans sa conception et dans sa

réalisation, donc dans sa genèse. Ainsi, lorsqu'un spectateur voit une œuvre, il ne doit pas juste la « voir », il doit apprendre à « savoir » la « lire » en analysant ses détails. C'est ce que l'auteur définit en énonçant : « A terme, le savoir l'emporte sur le voir ». Grâce à cette éducation du regard, le spectateur devient un lecteur averti, doté d'une compétence d'acquisition rapide des informations grâce à un simple balayage visuel.

Nous pensons qu'il est possible d'établir un parallèle entre la lecture par le spectateur averti du geste technique réalisé par le peintre vis-à-vis de sa toile, et la lecture par le co-pilote d'un geste technique réalisé par le pilote vis-à-vis de la surface tactile avionique. En effet, lorsque le peintre réalise un geste pour façonner son œuvre, il laisse une trace à l'intention du lecteur. Notre intention de représenter le geste par le biais d'un artifice graphique obéit aux mêmes critères. La trace retranscrit l'intention signifiante du peintre par rapport au dessein du message de son œuvre. De plus, dès lors qu'elle existe, elle devient le témoin de la singularité de son comportement gestuel. Elle reflète sa « puissance inventive » (Focillon 1943, 106). Henri Focillon décrit ainsi le travail de Katsushika Hokusai :

« Quelle main pourrait traduire ce qu'il y a de régulier et d'irrégulier, de hasardeux et de logique dans cette suite de choses presque sans poids (estampe) mais non sans forme, sur une rivière de montagne ? La main d'Hokusai, précisément, et ce sont les souvenirs des longues expériences de ses mains sur les divers modes de suggérer la vie qui ont amené le magicien à tenter encore celle-ci. Elles y sont présentes sans se montrer, et, ne touchant rien, elles guident tout » (Focillon 1943, 119).

Les mains et les gestes d'Hokusai ne peuvent être que les mains et les gestes d'Hokusai. Ils sont uniques et relatifs à l'expérience de sa vie. Lorsqu'un lecteur observe une toile (ici en l'occurrence une estampe), il ne perçoit pas le geste du peintre directement, il le perçoit à travers l'œuvre, en parcourant les indices qu'il a laissés dessus. Le lecteur se construit une représentation mentale du geste. Il n'existe pas de travail collaboratif direct entre le spectateur averti et le peintre. Cependant on peut estimer qu'ils construisent la toile conjointement, dans la mesure où la représentation créée par le peintre est destinée à l'œil du spectateur, tandis que celui-ci ne peut interpréter les traces laissées par le pinceau qu'en tenant compte des intentions du peintre. Des interactions naissent donc entre eux grâce au médium de la représentation.

Dans le cadre de la dématérialisation des interfaces avioniques et du changement gestuel associé, il apparaît que les pilotes doivent à leur tour reconstituer des représentations mentales pour comprendre la singularité des comportements gestuels. Cette représentation se fait en adéquation avec la primauté opérationnelle des informations avioniques. Cependant, tout comme pour le lecteur d'une toile, le pilote qui observe le geste de son collègue a besoin d'avoir une représentation graphique qui propose la notion de trace au sens du « *dettaglio* », du geste tel que nous venons de l'évoquer en début de chapitre. Dans la suite de notre thèse, nous appellerons cela : l'effet du geste.

L'analogie entre l'environnement pictural et l'environnement avionique nous conduit à distinguer ce que nous devons connaître, en tant que designer, pour « représenter » les

gestes via notre système de suppléance graphique, de ce que les pilotes « cherchent à voir » des gestes. Le peintre est contraint par les possibilités technologiques au même titre que le concepteur en informatique. De même que les pilotes ont besoin d'avoir un bagage de « savoir » technique pour « lire » les informations qui apparaissent sur un écran de pilotage, nous devons être conscients des réalités de l'environnement informatique pour proposer des solutions d'affichages permettant de coder efficacement les dimensions des gestes utiles à la conscience mutuelle. Dès que nous aurons acquis ces connaissances informatiques, nous pourrons analyser les gestes des pilotes et délimiter, en accord avec leurs besoins opérationnels, un cadre conceptuel de dimensions gestuelles à afficher graphiquement sur un écran

Que devons-nous « savoir » des contraintes technologiques pour concevoir une représentation des dimensions utiles à la conscience mutuelle lorsque celles-ci sont liées à des gestes techniques ?

Dans la mesure où notre problématique est issue du changement de paradigme entre des actions sur des contrôleurs physiques vers des actions sur des surfaces tactiles (cf. chapitre 1), nous pensons qu'un réajustement du lexique concernant les gestes est nécessaire. Nous faisons le choix de remplacer le terme « technique » par le terme « numérique ». Ainsi, nous décrirons par le terme « geste numérique » les gestes techniques ayant un rapport avec la manipulation directe ou indirecte d'un objet numérique. Qu'est-ce qui nous permet d'assimiler la technique au numérique ?

Nous nous appuyons ici sur la définition donnée par l'anthropologue André Leroi-Gourhan : « La technique est à la fois geste et outil, organisés en chaîne par une véritable syntaxe qui donne aux séries opératoires à la fois leur fixité et leur souplesse. La syntaxe opératoire est proposée par la mémoire et naît entre le cerveau et le milieu matériel » (A. Leroi-Gourhan 1964, 164). Leroi-Gourhan détermine ainsi la relation entre le geste humain, l'outil et la matière. Le geste manipulant l'outil façonne l'objet matériel mais également les processus opératoires humains. C'est parce que l'individu agit sur la matière en se confrontant à ses propriétés qu'il se développe cognitivement. Ces chaînes opératoires, que Leroi-Gourhan détermine comme des processus d'opérations, deviennent avec la répétition « des chaînes opératoires machinales ». La maîtrise de la technique conduit à l'automatisme du corps humain. La maîtrise de ces chaînes permet à l'individu de ne plus focaliser son attention sur l'exécution de ses gestes mais sur la conséquence de ceux-ci. « Les chaînes opératoires machinales sont le fondement du comportement individuel, elles représentent chez l'homme l'élément essentiel de la survie » (Leroi-Gourhan 1964, p29). Avec l'interaction gestuelle sur des surfaces numériques, la compréhension de ces chaînes opératoires devient plus complexe à appréhender pour les individus, parce qu'ils doivent comprendre un environnement informatique régi par des concepteurs humains (Bellotti et al. 2002). Il est possible que, chez certains utilisateurs, la conséquence d'une action ne soit pas en accord

avec les chaînes opératoires traditionnelles (Norman 2013). Dans la littérature scientifique spécialisée, l'expression : « geste numérique » n'est employée le plus souvent que pour nommer l'interaction gestuelle sur une application numérique. Néanmoins en accord avec la définition de Leroi-Gourhan, nous pouvons considérer que le geste numérique est avant tout technique. C'est pourquoi le geste technique devient dans ce contexte spécifique : numérique. Nous tenons à faire la distinction car le geste technique peut être exécuté indépendamment d'un objet numérique, tandis qu'un geste numérique implique indubitablement la notion d'interaction avec une machine informatisée. Au regard de cet éclairage, notre problématique prend donc la forme suivante :

Que devons-nous « savoir » des contraintes technologiques pour concevoir une représentation des dimensions utile à la conscience mutuelle dès lors que les gestes techniques liés à ces dimensions sont entrés dans l'ère numérique ?

Déroulé du chapitre

Pour répondre à notre problématique, nous avons organisé notre réflexion autour de trois sous-chapitres : l'analyse des gestes numériques par le prisme de la conception informaticienne, l'analyse du geste en tant que témoin du comportement individuel, enfin une analyse spécifique de la description des gestes techniques des pilotes.

Au sein du premier sous-chapitre nous commençons nos investigations en étudiant les travaux déterminant des cadres de conception portant sur l'interaction gestuelle produits par des acteurs (designers, chercheurs, ingénieurs) de la discipline Interaction Humain-Machine (cf. 2.1). Dans cette partie, nous débutons par l'analyse des contraintes algorithmiques et matérielles des machines permettant de réaliser de l'interaction gestuelle (cf. 2.1.1). Nous organisons ces travaux autour de trois savoirs fondamentaux : savoir identifier les gestes (cf. 2.1.1.A), savoir discriminer les gestes (cf. 2.1.1.B) et savoir optimiser l'utilisabilité des gestes (cf. 2.1.1.C). Ces travaux ont produit les caractérisations implicites des gestes numériques requises pour assurer le succès des interactions d'un point de vue algorithmique, matériel et relationnel, entre l'utilisateur et la machine. Nous poursuivons, conscient des impératifs techniques du domaine, en étudiant les travaux mis à la disposition des concepteurs pour créer les interactions gestuelles (cf. 2.1.2). Devant la quantité des travaux de caractérisation des gestes, nous ne proposons d'en décrire qu'une sélection. Cette sélection illustre la diversité des desseins adaptés à des besoins contextuels spécifiques (type de matériel d'interaction gestuelle, domaine, etc.). Une partie de ces caractérisations aborde l'aspect de singularité comportementale des gestes numériques par le biais de « fonctions ». Pour améliorer la conception des interactions au sujet des gestes, elles proposent d'impliquer les savoirs que les sciences humaines et sociales ont réunis sur ce thème.

Dans le second sous-chapitre, nous analyserons le geste technique du point de vue de l'individu (cf. 2.2). Nous décrivons d'abord une méthode d'élicitation permettant de définir les gestes par les utilisateurs eux-mêmes (cf. 2.2.1). Nous nous intéressons à cette méthode

parce qu'elle place l'utilisateur au centre de la démarche de définition des gestes indépendamment de la culture informaticienne. Nous poursuivrons nos investigations par une observation des vocabulaires associés aux gestes techniques d'après les Sciences Humaines et Sociales (cf. 2.2.2). Nous analyserons le rapport entre le geste et la parole (cf. 2.2.3), l'apprentissage cognitif des procédés d'opérations des gestes (cf. 2.2.4) et enfin la notion de dextérité en tant qu'indicateur d'expérience de l'individu (cf. 2.2.5). L'acquisition de ces connaissances va nous permettre d'enrichir notre savoir sur la définition des gestes.

Pour le troisième sous-chapitre, l'acquisition des « savoirs » présentés dans les deux premiers sous-chapitres a pour but de nous permettre d'appréhender, en connaissances des contraintes informatiques et de la réalité sociotechnique, une analyse des gestes des pilotes (cf. 2.3). Nous avons réalisé une série d'observations en environnement réel et en simulateurs qui ont été filmées et partiellement retranscrites. Nous proposons une analyse qui nous permette de déterminer des dimensions gestuelles que nous afficherons ultérieurement sur notre outil de suppléance graphique. Les résultats de cette analyse constituent une base de travail importante pour le développement des designs présentés aux pilotes lors d'ateliers de conception participative (cf. chapitres 5 et 6).

2.1 ANALYSE DES GESTES NUMERIQUES PAR LE PRISME DE LA CONCEPTION

Dans ce sous-chapitre nous déterminons les contraintes à respecter pour concevoir des interactions gestuelles. En effet, bien que notre intention générale soit d'identifier les dimensions des gestes nécessaires à la conscience mutuelle, nous devons d'abord établir un cadre à partir duquel il sera possible de modéliser les gestes numériques.

Pour cela, nous explorerons les travaux produits par les concepteurs et les chercheurs du domaine de l'Interaction Humain-Machine par rapport à la définition des gestes numériques. Nous proposons une lecture de ces travaux d'après deux catégories d'intentions. La première catégorie regroupe des travaux présentant diverses méthodes permettant d'apporter des solutions aux contraintes liées aux interactions gestuelles (cf. 2.1.1). Leurs intentions ne sont pas de produire des définitions ou des caractérisations des gestes numériques. Cependant, en établissant le constat de ces contraintes, ils déterminent des cadres implicites et déductifs de définition des gestes numériques. A l'inverse, la seconde catégorie regroupe des articles ayant proposés des travaux que nous nommerons « réflexifs ». Ils définissent les gestes numériques en énonçant des caractéristiques au regard de l'étude de la littérature scientifique (cf. 2.1.2). En prévision de la définition finale des dimensions des gestes à représenter, nous proposons une lecture organisée autour de huit dimensions constitutives des gestes numériques. Au terme de cette exploration, nous constaterons que la définition des gestes numériques à afficher est complexe pour deux raisons. D'abord, il n'y a pas de définition unique puisqu'elle dépend du cadre technologique (e.g. capacités des dispositifs de capture, algorithmes de reconnaissance, etc.) dans lequel le geste est analysé. Ensuite, les concepteurs sont confrontés au problème de la compréhension du comportement humain. Ce constat nous poussera dans le sous-chapitre suivant (cf. 2.2) à dépasser les frontières de l'informatique pour comprendre la définition des gestes numériques d'un point de vue sociotechnique.

2.1.1 Caractérisations implicites et tributaires des contraintes technologiques

Dans cette section, nous présentons l'impact des techniques et du matériel sur la définition des gestes numériques. Lorsque les concepteurs et les chercheurs en Interaction Humain-Machine veulent concevoir une interaction gestuelle, ils doivent respecter les possibilités techniques des dispositifs informatiques. Ces contraintes façonnent une définition implicite des gestes numériques. Devant l'ampleur de la littérature spécialisée concernant les interactions gestuelles, nous organiserons notre étude autour de trois problématiques : la question de l'identification, la question de la discrimination et enfin la question de l'optimisation de l'utilisabilité. Notre objectif est d'identifier les contraintes des possibilités techniques pour la définition des gestes numériques.

A Contraintes d'identification

Le premier constat qui s'impose à propos à faire pour faire de l'interaction gestuelle est qu'il faut identifier ce qui relève du geste numérique et de ce qui n'en relève pas, à la fois pour les concepteurs mais également pour les utilisateurs. Richard Bolt (Bolt 1980) propose le projet multimodal : *Put, That, There* (cf. Figure 23). L'utilisateur, assis devant une projection, peut créer, déplacer, supprimer des objets graphiques en combinant deux modalités : ses gestes et sa parole. Le geste est utilisé pour pointer une direction. L'utilisateur indique une zone vierge ou un objet graphique en tendant son bras et en dépliant l'index, puis il annonce oralement une action à accomplir, par exemple : « créer un cercle jaune, là ». Un curseur, présent sur la projection, indique la zone d'interaction correspondant au geste de pointage de l'utilisateur. Cet objet graphique aide cognitivement l'utilisateur à faire correspondre la direction de son bras avec sa localisation numérique. Du point de vue du concepteur, l'identification des gestes consiste à reconnaître la direction qu'indique l'index de l'utilisateur. Richard Bolt utilise l'approche intitulée « *Gesture Vision-Based* » (Pavlovic, Sharma, and Huang 1997). Cette méthode permet de capturer via une caméra l'emplacement de l'index pour faire correspondre la direction visée par l'utilisateur avec le point d'intérêt sur la surface projetée. D'un point de vue de l'utilisateur, le geste est utilisé comme pointeur et accompagne spatialement la parole. C'est l'utilisateur qui détermine les gestes à identifier en énonçant oralement des actions.

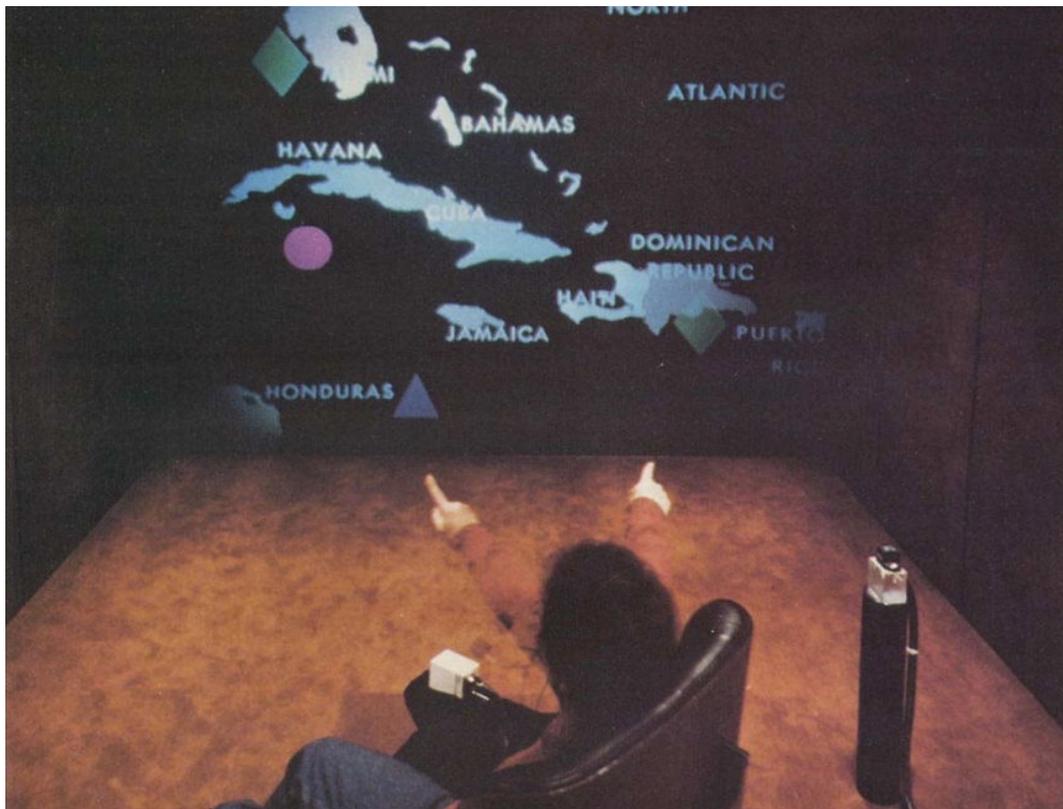


Figure 23. Projet *Put, That, There* par Richard Bolt, 1980.

L'usage de la multi-modalité se présente comme une solution efficace au problème de l'identification parce qu'elle n'oblige pas le concepteur à y répondre. Il délègue à l'utilisateur le soin de définir lui-même et consciemment ce qu'il juge être le geste numérique à prendre en compte par le système. Néanmoins, notre objectif ici est de « savoir » ce qu'il faut « représenter » pour comprendre le geste numérique. C'est pourquoi, nous focalisons à présent notre analyse sur les études dénuées de multi-modalité et nous posons la question suivante : comment les concepteurs déterminent-ils l'identification des gestes numériques par les systèmes informatiques sans avoir recours à la multi-modalité ?

Quels que soient les dispositifs de capture (e.g. écran tactile, caméra, gant de donnée, etc.) le processus de reconnaissance des gestes peut être décrit avec trois principales phases : la détection (1), le suivi (2) et la reconnaissance (3) (Pavlovic, Sharma, and Huang 1997; Rautaray and Agrawal 2015). Pour évoluer dans chacune de ces trois phases, les concepteurs ont le choix entre différentes techniques associées aux environnements et aux capacités des dispositifs informatiques.

(1) La Détection est la première phase de la reconnaissance.

Il s'agit d'identifier ce qui relève d'un geste par opposition à un environnement, en l'occurrence un fond, et de l'attribuer à un doigt (e.g. multi-touch) ou à un utilisateur (e.g. dans le cas d'un dispositif collaboratif). Durant cette phase, la principale opération à accomplir est la segmentation. Il s'agit de sélectionner le geste en éliminant les régions de l'image (e.g. caméra) ou de la surface (e.g. écran tactile) non intéressantes. De nombreuses techniques existent pour accomplir cette tâche, nous en citons quelques-unes en exemples : utiliser la couleur de peau (Bretzner, Laptev, and Lindeberg 2002; McKenna and Morrison 2004) ; différencier les nuances de gris (Cui and Weng 2000) ; utiliser la profondeur (Shotton et al. 2011) ; recouvrir le membre d'un habit de couleur, par exemple un gant coloré (Lamberti and Camastra 2011) ; construire un modèle 3D relatif à la partie du corps analysée via des points d'intérêts spatio-temporels (De Smedt, Wannous, and Vandeborre 2016). Cependant, chacune de ses techniques comporte des limites associées aux possibilités technologiques, matérielles et environnementales. Par exemple, l'identification du geste par l'utilisation de la couleur de peau ou par la distinction des nuances de gris, est contrainte par l'occultation, notamment lorsque les deux bras se croisent ou lorsque la lumière présente dans l'environnement est trop sombre (Escalera, Athitsos, and Guyon 2018). Un autre exemple concerne les limites technologiques de captures (e.g. caméra) ou d'encombrement (e.g. table interactive) puisqu'il faut que les gestes soient réalisés dans des zones déterminées en amont par le concepteur d'après les capacités technologiques des dispositifs de capture (Moeslund, Hilton, and Krüger 2006; Cirelli and Nakamura 2014). Enfin, la dernière contrainte que nous présentons concerne la définition à l'origine de ce qui doit être détecté en tant que geste. Ce choix est « arbitraire » (Wobbrock, Morris, and Wilson 2009) et peut être complexe dans le cas d'une modélisation en 3D puisque cela implique une connaissance biomécanique de la morphologie humaine.

(2) Le Suivi est la seconde phase de la reconnaissance.

Après avoir isolé le geste dans l'espace, on utilise la temporalité pour identifier le mouvement. Il faut mettre en correspondance une succession d'images du geste en action pour déterminer un mouvement. Le mouvement peut concerner une partie du corps ou la totalité. L'accomplissement de cette phase peut être réalisée par de nombreuses techniques dont nous mentionnons quelques exemples : suivre les points d'intérêt spatiaux-temporels des modèles 3D pour produire des histogrammes de gradient orienté (Kaaniche and Bremond 2009); suivre l'évolution des contours (Cootes, Edwards, and Taylor 1998); estimer les trajectoires en 3D (Welch and Bishop 2006) en combinant la 2D et la 3D (Migniot and Ababsa 2013) ; décomposer l'image en zone de couleur selon la profondeur (Sobottka and Pitas 1996) ; suivre les silhouettes en même temps que la profondeur (Grest, Krüger, and Koch 2007). Cependant, comme pour la première étape de la reconnaissance, toutes les techniques de suivi conditionnent implicitement une définition des gestes numériques. Par exemple, les changements d'échelle (proximité avec le capteur) et d'orientation des utilisateurs diminuent la performance des techniques basées sur la constitution d'histogrammes de gradient orienté pendant la réalisation des gestes (Mkhinini and Horain 2013). Voici un autre exemple : toutes les techniques requièrent de la puissance de calcul importante, c'est pourquoi plus le geste est long, plus il demande de la ressource informatique (Garg et al. 2009). C'est pourquoi, afin de limiter la latence, les gestes doivent être réalisés selon des vitesses adaptées aux possibilités techniques des dispositifs de capture en matière de flux de données (Cirelli and Nakamura 2014). Par ailleurs, une vitesse de mouvement trop élevée peut annuler la prise en compte du geste et générer auprès de l'utilisateur un inconfort d'utilisation. Nous noterons qu'au-delà de 40% de taux d'erreur, l'utilisateur cherche un moyen d'interaction alternatif. Ce taux descend à 10% si ce moyen alternatif est rapidement accessible (Karam and Schraefel 2006).

(3) La Reconnaissance est la troisième et dernière étape de la méthode.

Après avoir identifié le geste par rapport à une distinction avec l'environnement, puis par le mouvement effectué dans l'espace et dans le temps, il faut vérifier que le geste identifié correspond à une interaction attendue par le système informatique. Cette troisième étape dépasse la question de l'identification. En effet, les gestes observés sont comparés à une classification déjà existante. Nous aborderons cette phase dès la prochaine sous-section (cf. 2.1.1.B)

Nous avons décrit une série d'exemples de méthodes et de contraintes associées à la reconnaissance des gestes parce qu'elles illustrent l'impact des algorithmes et des capacités matérielles sur la définition implicite des gestes numériques. Nous avons fait le choix de présenter majoritairement des techniques orientées vers la reconnaissance visuelle parce que nous pensons qu'elles prennent en considération davantage de caractéristiques sur le geste que les dispositifs portés (e.g. gant de données), les interactions tactiles (e.g. coordonnées axiales en x et y sans l'axe z, bien qu'il soit possible de les utiliser dans certaines

occasions comme avec l'intensité de la pression des doigts sur l'écran (Antoine, Malacria, and Casiez 2017)).

La résolution des problèmes associés à l'identification des gestes numériques assure l'accomplissement et la performance, d'un point de vue fonctionnel, des interactions gestuelles. L'objectif de ces travaux n'est pas d'énoncer des définitions. Cependant, ils déterminent implicitement et « arbitrairement » (Wobbrock, Morris, and Wilson 2009) des formes des gestes numériques (points d'intérêt spatiaux-temporels, distance avec la caméra, problème d'occultation avec la couleur ou le contour) et leurs mouvements (respect de la zone de capture, vitesse, orientation du corps).

B Contraintes de discrimination

Nous avons présenté les deux premières phases de la reconnaissance de geste dans la sous-section précédente (cf. 2.1.1.A). Au sujet de la troisième phase, nous faisons le choix de la présenter selon deux problématiques : d'abord, la discrimination des gestes à la fois de manière temporelle et formelle, ensuite la relation entre la forme du geste et sa cohérence sémantique telle qu'elle est perçue par l'utilisateur. En effet, une fois l'identification du geste effective, les concepteurs peuvent exploiter la diversité des gestes pour construire un vocabulaire gestuel. Pour ce faire, ils doivent concevoir une méthode de découpage temporel nécessaire à la discrimination des gestes à interpréter. Puis, il est nécessaire de déterminer un vocabulaire de gestes réalisables morphologiquement par les utilisateurs. Enfin les concepteurs doivent consciemment définir une relation sémiotique entre la réalisation des gestes numériques et l'intention de l'utilisateur. Ils doivent faire en sorte que la réalisation des gestes numériques ait un haut niveau d'utilisabilité, c'est-à-dire qu'elle soit efficace, efficiente et satisfaisante auprès des utilisateurs pour interagir avec les machines informatiques. Nous développerons la première problématique portant sur la discrimination des gestes numériques dans cette sous-section, puis nous ferons de même pour la seconde problématique portant sur l'utilisabilité dans la section suivante (C).

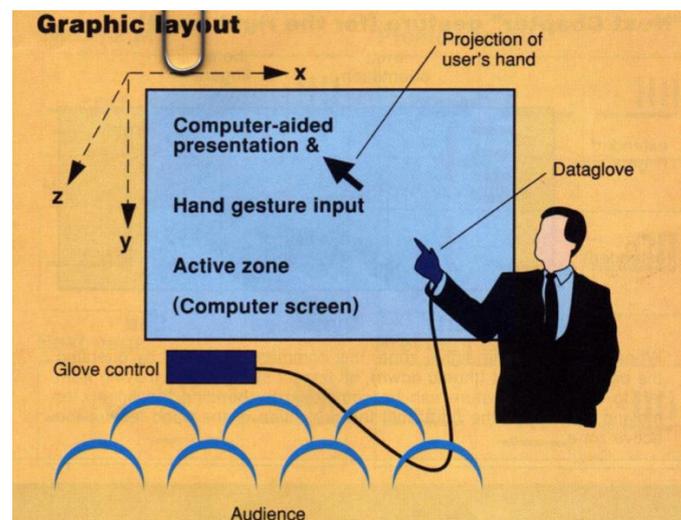


Figure 24. Schéma du projet *Charade* par Thomas Baudel et Michel Baudouin-Lafon, 1995.

Charade (Baudel and Beaudouin-Lafon 1993) est un excellent cas d'étude pour nous parce qu'il expose clairement les problématiques de découpage temporel des gestes numériques et leurs discriminations formelles. Baudel & Beaudouin-Lafon proposent une application permettant de contrôler la gestion d'une présentation numérique en utilisant les degrés de liberté de la main et des mouvements de la partie haute du corps humain (cf. Figure 24). Le scénario est le suivant : placé devant la projection de ses images, l'utilisateur peut contrôler, en effectuant un des seize gestes possibles (cf. Figure 25), le déroulé de sa présentation.

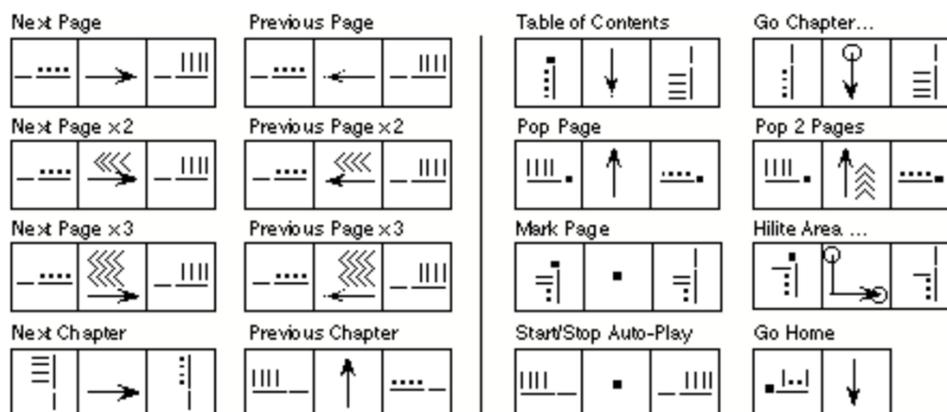


Figure 25. Exemple de vocabulaire des gestes numériques du projet *Charade*. Les actions sont indiquées au-dessus de chaque composition de pictogrammes : « Page suivante », « Page suivante x2 », « Page précédente », « Aller au chapitre ».

L'utilisateur est équipé d'un *dataglove* (gant numérique) Ce dispositif utilise l'approche dite : « *Gesture Data-Glove Based* ». Le principe du processus de reconnaissance ne diffère pas de celui du *Gesture Vision-Based*. Ce sont les méthodes qui changent afin d'être cohérentes avec les technologies de capture (Sturman 1992). Dans l'application *Charade*, l'utilisateur renseigne le système sur le geste à identifier lorsqu'il agit dans une zone spatialement déterminée. Pour informer l'utilisateur de la prise en compte de ses gestes, un pictogramme représentant sa main apparaît sur la projection. Ses coordonnées sur la projection coïncident avec la position spatiale de la main de l'utilisateur. Cette méthode facilite l'identification parce qu'elle laisse à l'utilisateur le soin de définir lui-même les gestes qu'il souhaite être numériques.

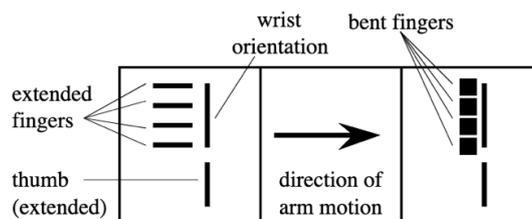


Figure 26. Schéma descriptif de construction des gestes numériques pour *Charade*.

Pour discriminer les gestes numériques entre eux, Baudel & Baudouin-Lafon ont imaginé un système de découpage temporel : « Each gestural command is described by a start position, a dynamic phase and an end position » (Baudel and Beaudouin-Lafon 1993, 4)⁶. Les auteurs présentent le geste selon trois temps représentés par trois cellules (cf. Figure 26). Il y a les temps discrets de début et de fin pour encadrer le geste puis le mouvement continu du bras au milieu. Le temps de fin est optionnel comme par exemple dans le cas de la commande « aller à l'accueil » (cf. Figure 25). La réalisation d'une posture statique de la main déclenche un geste numérique. Dans les cellules des temps discrets, la grande ligne représente l'inclinaison du poignet, les quatre lignes perpendiculaires indiquent les doigts (index, majeur, annulaire, auriculaire) enfin la ligne dans le prolongement de la ligne du poignet représente le pouce. Dans le cas où les lignes sont respectivement remplacées par des carrés, cela signifie que le ou les doigts sont repliés. Enfin dans la cellule centrale représentant le mouvement, le pictogramme représente la direction du mouvement par l'orientation d'une flèche. Lorsqu'il y a un cercle sur la flèche cela indique à l'utilisateur qu'il doit commencer ou terminer son mouvement dans une zone spécifique (par exemple pour l'action « Surligner » l'utilisateur doit faire correspondre son mouvement avec les positions de ce qu'il veut surligner).

L'analyse du projet *Charade* nous renseigne sur une méthode de construction temporelle des gestes. Il est possible d'associer le commencement et la fin d'un geste selon des formes de posture spécifique. Cette méthode est très largement répandue (Krupka et al. 2017; Hachaj and Ogiela 2014; Chevaldonné, Mérienne, and Neveu 2006). Dans le cas des gestes numériques continus, c'est-à-dire sans demander à l'utilisateur de réaliser une posture spécifique pour annoncer la fin de son geste, Pragati Garg (Garg et al. 2009) constate qu'il est difficile pour les concepteurs de définir ces marqueurs temporels parce qu'il n'y a pas de norme sur la délimitation des gestes. D'après les auteurs, ce problème porte également le nom de « *gesture spotting* » ou « *temporal gesture segmentation* ».

En prolongement de cette analyse, nous proposons une liste de cinq critères à prendre en considération lors d'une conception d'un vocabulaire de gestes :

- (1) D'abord, les formes gestuelles doivent être identifiables par les matériels de capture et les algorithmes (cf. 2.1.1.A).
- (2) Ensuite, les formes gestuelles doivent respecter les possibilités anatomiques des muscles et des squelettes des utilisateurs sans causer d'inconfort musculaire. En ce qui concerne la main, sa morphologie permet une combinaison théorique jusqu'à 29 degrés de libertés en 3D : 23 degrés de libertés par les articulations de la main au-dessus du poignet et 6 degrés de libertés avec la paume de la main et le poignet

⁶ Baudel et Baudouin-Lafon appellent leurs gestes des gestes de commande. Nous préférons le terme gestes numériques pour les raisons énoncées dans l'introduction du chapitre 3.

(cf. Figure 27) (Sturman 1992) réduite en pratique à 26 par les possibilités techniques de capture (Oikonomidis, Kyriazis, and Argyros 2011) et 10 degrés (translation et rotation uniquement des doigts) en 2D (Brouet, Blanch, and Cani 2013). Ces degrés de libertés sont déterminés en fonction des possibilités de translation, de rotation et d'élévation pour chaque articulation entre les os de la main et ceux du bras. Des résultats d'étude (Brouet, Blanch, and Cani 2013) démontrent qu'une interaction gestuelle sur surface tactile ne doit pas dépasser l'usage simultané de 3 degrés de liberté sinon elle génère un inconfort physique auprès de l'utilisateur. De nombreuses études ergonomiques montrent l'incidence de la position des écrans par rapport à l'utilisateur et l'incidence de la durée des interactions sur la fatigue musculaire et sur des troubles musculo-squelettiques (Barbé, Mollard, and Wolff 2014; Bachynski et al. 2015).

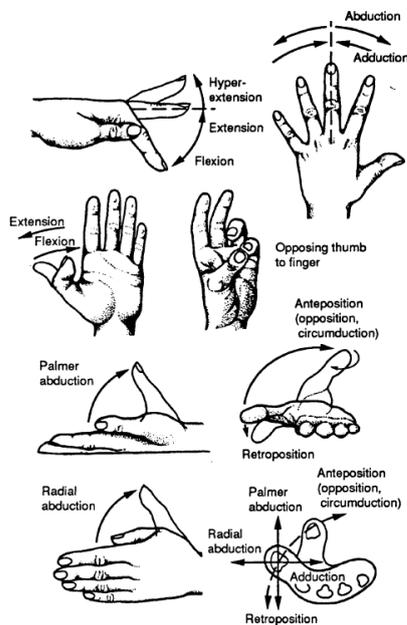


Figure 27. Schéma descriptif des degrés de liberté de la main par David Sturman, 1992.

- (3) La complexité de réalisation et de mémorisation des gestes numériques doit être relative aux types d'utilisateurs. L'utilisation d'une application sur un dispositif mobile de type smartphone dans un environnement en mouvement comme un bus ou un métro nécessite des gestes numériques simples et réalisable par une très large variété de profil d'utilisateur (Baglioni, Lecolinet, and Guiard 2009). Néanmoins, dans le cas de la mise en place d'un vocabulaire gestuel spécialisée à un corps de métier, où un délai d'apprentissage est disponible, la complexité peut être supérieure. Stéphane Chatty (Chatty and Lecoanet 1996) propose la mise en place dans le domaine du contrôle aérien d'un vocabulaire adapté aux besoins de l'activité sur une surface tactile avec un stylo numérique. Bien que des limites apparaissent par rapport à la criticité du contexte de l'évaluation, les résultats montrent que l'apprentissage des gestes n'est pas rédhibitoire pour les contrôleurs

aériens. La complexité doit également être adaptée aux personnes munies d'un handicap comme par exemple les aveugles. Les applications sur des écrans tactiles nécessitent l'usage conjoint de la vision et des gestes. L'importance omniprésente de la vision exclut de fait les aveugles. Il est donc nécessaire de mettre en place des moyens de substitution pour remplacer la vision en proposant un vocabulaire gestuel basé sur les retours haptiques et sonores. Dans son article, Anke Brock (Brock et al. 2014) propose des guides tangibles pour représenter des cartes de lieux géographiques accompagnés de retours auditifs pour énoncer les légendes des sites d'intérêts. Tiago Guerreiro (Guerreiro et al. 2008) propose un système de sélection de lettre alphabétique à l'aide d'une télécommande munie d'un écran tactile. L'utilisateur choisit sa lettre en naviguant dans l'alphabet grâce à des gestes directionnels (translation vers le haut, le bas, la gauche ou la droite) et valide son choix grâce à un retour auditif.

- (4) En accord avec les contraintes techniques (A), l'environnement est un facteur important dans la mise en place d'un vocabulaire gestuel.
- (5) Enfin, la mise en place d'un vocabulaire gestuel doit prendre en compte les spécificités culturelles du ou des types d'utilisateurs. Par exemple, le psychologue Geert Hofstede (Hofstede 2011) identifie six facteurs à l'origine de la diversité culturelle : le niveau d'acceptabilité des différences hiérarchique de statut et de pouvoir entre des individus d'une société ; le niveau d'acceptabilité de l'incertitude face aux événements du futur ; le niveau de liberté ou d'autonomie de l'individu face à la communauté, avec l'approche masculine ou féminine ; le cas où la société favorise la compétition entre les individus ou alors la recherche de consensus ; le niveau de plaisir face à la modération des règles et des libertés, le niveau d'acceptabilité de la vertu à court ou long terme, c'est-à-dire où la société privilégie les traditions et les normes déjà établies sans envisager de changement ou alors son contraire en encourageant la persévérance et les efforts pour s'adapter aux évolutions des problématiques du futur. Ces six facteurs ont un impact sur le comportement gestuel des utilisateurs (Rehm, Bee, and André 2008). L'étude de Rafael E. Núñez (Núñez 2016) est un autre exemple de ce phénomène. Il montre comment l'imaginaire propre aux différentes cultures sociales conduit à attribuer des significations différentes à une même forme de geste. Il étudie la façon dont les Aymara, un peuple amérindien dans les Andes, réalisent le geste signifiant « quelque chose à venir, dans le futur ». Il constate qu'à l'inverse des occidentaux, les gestes sont inversés. Ils représentent le futur en indiquant ce qui se trouve derrière eux et le passé devant eux parce qu'ils peuvent voir le passé alors que le futur leur est imperceptible, inconnu. Ce fait démontre « qu'il n'y a pas de modèle unique et universel de mode d'abstraction, même dans le cas d'une entité aussi fondamentale que le temps. » (Núñez 2016, 42).

En conclusion, cette sous-section nous a permis de comprendre comment l'importance de la délimitation temporelle des gestes numériques conditionne la construction d'un

vocabulaire de gestes par rapport à sa reconnaissance par la machine. L'aspect « sémiotique », c'est-à-dire ce qui fait sens auprès de l'utilisateur, est une notion complexe à appréhender par le seul prisme technologique. Pour aider à cela, il est possible de s'appuyer sur des règles d'utilisabilité. Dans la prochaine sous-section (cf. 2.1.1.C), nous présenterons cette notion qui contribue, au même titre que les contraintes algorithmiques ou matérielles, à définir implicitement les gestes numériques du point de vue de la machine.

C Contraintes d'utilisabilité

Lors de la conception des gestes numériques, les concepteurs doivent réfléchir à la notion de cohérence entre la réalisation du geste par l'utilisateur et son effet sur le système informatique. Dans cette sous-section, nous présenterons ce phénomène en posant le problème suivant : comment faire coïncider la construction artificielle d'un geste numérique par un concepteur avec la capacité cognitive de l'utilisateur pour le pratiquer ? Nous abordons cette question en étant conscients de la distance qu'elle génère avec les contraintes technologiques et techniques tributaires des capacités des dispositifs informatiques. Cependant, nous pensons qu'elle contribue à définir implicitement les gestes numériques puisqu'elle aide à façonner, par contraintes, un cadre de conception.

L'organisation internationale de normalisation (ISO) détermine l'efficacité ergonomique d'une interface d'après le concept « d'utilisabilité », c'est-à-dire le « degré auquel un système, un produit ou un service peut être utilisé par des utilisateurs spécifiés pour réaliser des objectifs spécifiés avec efficacité, efficience et satisfaction dans un contexte d'utilisation spécifié » (ISO 9241-11 2018). L'efficacité correspond à la « précision » et au « degré d'achèvement » permettant à l'utilisateur « d'atteindre des objectifs spécifiés ». L'efficience correspond au rapport entre les « ressources utilisées » et les « résultats obtenus ». Par ressources, l'ISO spécifie le temps, l'effort humain, les coûts et les matériaux. En d'autres termes, l'efficience désigne la capacité d'atteindre rapidement l'objectif spécifié en sollicitant le moins de ressources possibles. Enfin, la satisfaction désigne la cohérence entre le degré de satisfaction physique, cognitif et émotionnel ressenti durant « l'utilisation d'un système, produit ou service » et les besoins ou attentes des utilisateurs. Ce critère prend en compte la satisfaction de l'apprentissage par la pratique de l'utilisation de l'interface. Pour atteindre ces trois conditions, les concepteurs peuvent concevoir les relations de leurs interactions gestuelles sur des interfaces en s'appuyant sur des méthodologies comme celle instituée par Don Norman (Norman 2013) : le cycle action/perception. Ce modèle psychologique décrit les sept étapes rencontrées par l'utilisateur lors de son interaction avec l'interface informatique.

- (1) Élaborer l'objectif à atteindre.
- (2) Traduire cet objectif en une série de tâches non ordonnées permettant d'atteindre l'objectif.
- (3) Coordonner les tâches en une séquence d'action spécifique.
- (4) Exécuter la séquence d'action sur l'interface informatique.
- (5) Percevoir le résultat de l'état de l'interface informatique.

- (6) Interpréter ce résultat.
- (7) Évaluer ce résultat par rapport à l'objectif initial à atteindre.

La performance d'une interaction repose sur le respect de ces étapes. Ce modèle montre l'importance de deux aspects. D'abord, elle expose le besoin de cohérence dans la relation entre trois éléments : l'objectif à atteindre, le moyen pour y parvenir et la représentation du résultat. Ensuite, la réalisation du moyen et la lisibilité du résultat doivent être facilement accessibles et compréhensibles. Dans les interfaces traditionnelles de type « *Windows, Icons, Menus and Pointing device* » (WIMP) la traduction de l'objectif à atteindre en des actions à réaliser s'effectue facilement. L'utilisateur manipule des objets comme la souris ou le clavier et sélectionne des objets graphiques sous la forme de label, de menu déroulant ou de boutons. L'utilisation de ces interfaces répond à des normes conventionnellement établies auprès des utilisateurs. Lynn Hoff (Hoff, Hornecker, and Bertel 2016) a montré l'influence, dans son travail d'élicitation, de ces conventions sur les processus cognitifs mis en place par les utilisateurs pour atteindre leurs objectifs et cela peu importe la diversité culturelle ou la différence des niveaux de maîtrise des outils informatiques par les utilisateurs. Victoria Bellotti (Bellotti et al. 2002) constate que la réalisation des gestes numériques par les utilisateurs est plus complexe parce qu'il n'y a pas de convention communément admise. Le travail de Walter (Walter, Bailly, and Müller 2013) illustre ce problème. Ils proposent trois types de stratégie pour indiquer les gestes à réaliser sur un écran disposé dans un espace public. (1) Division spatiale : on indique en permanence le geste à faire sur un espace dédié avec un pictogramme et sa légende textuelle ; (2) Division temporelle : l'application s'interrompt et affiche le geste à effectuer ; (3) Intégration : on montre les gestes à effectuer par des indices graphiques directement dans l'application. Le résultat principal de l'étude montre l'efficacité de la division spatiale. Néanmoins, par rapport à notre problématique, les résultats montrent que les utilisateurs découvrent intuitivement un vocabulaire de gestes à partir d'un geste de départ, notamment en imitant et en élargissant les comportements des autres utilisateurs. Cela signifie que l'apprentissage est relatif à l'utilisateur et dépend de son expérience acquise avec le dispositif informatique. Donc à chaque nouveau dispositif, il faut réitérer le processus. Pour optimiser l'utilisabilité des interactions gestuelles, Victoria Bellotti propose cinq règles à suivre sous forme de question en s'inspirant des sept étapes du cycle action/perception de Don Norman. Nous proposons de présenter uniquement les défis associés à la conception des interactions : exécuter l'action puis contrôler la cohérence entre le résultat et l'action exécutée.

Exécuter l'action.

- Comment identifier⁷ et sélectionner un objet possible pour l'action ?

⁷ L'identification est ici employée selon le point de vue de l'utilisateur. À ne pas confondre avec l'étape d'identification nécessaire au processus de reconnaissance des gestes abordés dans les sections précédentes (A, B).

- Comment identifier, sélectionner une action et la lier à l'objet ou aux objets ?
- Comment éviter une sélection non désirée ?
- Comment gérer des opérations complexes (exemples : objets multiples, actions et fonctions plus abstraites qui sont difficiles à représenter graphiquement comme la sauvegarde) ?

Contrôler la cohérence entre le résultat et l'action exécutée.

- Comment faire pour rendre perceptible, continue ou interrogeable l'état du système ?
- Comment proposer un retour d'information adapté et correctement dirigé ?
- Comment fournir distinctement un retour d'information sur le résultat de l'action et sur l'état du système ?

Bien que ces questions ne disposent pas de réponse universelle, elles invitent les concepteurs à inclure dans leurs conceptions des considérations sur le « comportement sociotechnique » des gestes numériques. En effet, à l'inverse des contraintes uniquement technologiques (cf. 2.1.1.A et 2.1.1.B), ces questions conditionnent la conception des gestes numériques parce qu'elles déterminent des limites au-delà desquelles les gestes numériques ne seront pas efficaces, efficaces ou satisfaisants pour les utilisateurs. Cependant, les réponses à ces questions sont laissées librement à l'évaluation des concepteurs. En somme, cela nous enseigne à nouveau sur la manière dont les contraintes conditionnent implicitement les gestes numériques, cette fois d'un point de vue cognitif propre aux utilisateurs. Le geste numérique est traité comme un objet technique entièrement configurable où chaque règle témoigne d'une grande complexité à la fois de décision mais également de performance technique au niveau des concepteurs.

D Conclusion

En étudiant les technologies et les techniques permettant l'interaction gestuelle nous avons ciblé trois questions : (A) Comment identifier les gestes par le système informatique ? (B) Comment discriminer les gestes par le système informatique ? (C) Comment optimiser l'utilisabilité des gestes ? Nous voyons que pour répondre à ces problématiques, il existe de nombreuses méthodes. Néanmoins, malgré cela, aucune ne s'émancipe de contrainte sur la caractérisation des gestes numériques basées sur les possibilités technologiques. Ces contraintes (vitesse, occultation, zone de capture, puissance de calcul, luminosité, durée, etc.) ont façonné des définitions implicites des gestes relatives à chacune d'elles. Le geste numérique est d'abord un objet perceptible et identifiable par rapport à un environnement. Cet objet évolue dans l'espace et dans le temps. Cette évolution est communément appelée : un mouvement. La diversité des mouvements équivaut aux libertés biomécaniques et anatomiques de la main et du bras en action. En utilisant cette diversité, nous pouvons exploiter le principe de vocabulaire gestuel. Il s'agit d'assigner respectivement un message informationnel à plusieurs mouvements. Cette opération demande d'établir arbitrairement

les conditions d'exécution pour chaque mouvement (marqueurs temporels, trajectoire, mémorisation). Enfin, parce que le geste appartient à l'utilisateur, il faut respecter des contraintes d'utilisabilité afin que le message soit compréhensible et réalisable.

2.1.2 Caractérisations réflexives des dimensions des gestes

Nous présenterons dans cette section des travaux « réflexifs » dont l'ambition est d'énoncer explicitement des caractéristiques constitutives des gestes numériques. Ces articles constituent des « guides de conception » (Mackay and Fayard 1997) et proposent malgré la différence sémantique (e.g. classifications, taxinomies, caractérisations, dimensions, fonctions) des définitions pour comprendre la diversité comportementale des gestes numériques. Au regard de cette littérature spécialisée, nous proposons une première version de notre propre cadre de dimensions basé uniquement sur les gestes numériques (nous confronterons ultérieurement ce cadre avec des études provenant d'abord de la littérature en Sciences Humaines et Sociales puis avec notre expertise du comportement gestuel des pilotes). Nous avons identifié huit dimensions : modalités d'entrée, modalité de sortie, identification, coordonnées, temporalité, mouvement, statut et fonction.

A Modalités d'entrée et de sortie

<i>Dimensions</i>	Modalité d'entrée				Modalité de sortie				
<i>Références</i>	<i>Caractéristiques</i>				<i>Caractéristiques</i>				
Mauricio Cirelli	Single-touch		Multi-touch						
Anne Roudaut	Mouvement				Vocal	Passive	Kinesthésique		
	Continus		Discret				Embarquée	Visuelle	Auditive
	Pointage de widgets	Langage gestuel	Langage gestuel hybride	Entrée par claviers complets	Entrée par claviers réduits	Entrée par boutons uniques			
Maria Karam	Technologies d'entrées perceptives				Technologies d'entrées non perceptives		Visuelle	Auditive	Command Directed Output
	Visuelle		Auditive		Haptique				
Mathias Baglioni	Technologies d'entrées		(Contexte) Plate-forme			Visuelle	Auditive	Haptique	

Figure 28. Caractéristiques constitutives de la dimension sur les modalités d'entrée et de sortie des gestes numériques.

Les deux premières dimensions concernent les modalités d'entrée et de sortie des interactions gestuelles (cf. Figure 28). Il s'agit des moyens techniques utilisés par les utilisateurs pour envoyer (entrée) et recevoir (sortie) des informations avec la machine informatique. Nous décrivons ces modalités d'après quatre travaux : la classification des interactions sur mobiles par Anne Roudaut (Roudaut and Lecolinet 2007), la classification

d'interactions gestuelles par Maria Karam (Karam and Schraefel 2005), la caractérisation des gestes numériques sur des interfaces tactiles par Mauricio Cirelli (Cirelli and Nakamura 2014) et la caractérisation des gestes numériques sur des dispositifs mobiles par Mathias Baglioni (Baglioni, Lecolinet, and Guiard 2009).

Cette dimension fait appel aux capacités sensorielles des utilisateurs. Anne Roudaut présente la variété des interactions sur mobiles d'après le cycle action/perception de Don Norman (cf. 2.1.1.C). Elle présente trois types de modalités en entrée (mouvement, vocale, passive) et trois types de modalités en sortie (visuelle, audio, kinesthésique). Parce que notre ambition est ici de comprendre le geste numérique, nous focalisons notre attention sur la *modalité du mouvement* en entrée et la *modalité kinesthésique* en sortie. En ce qui concerne le mouvement, elle propose trois types d'interactions gestuelles possibles :

- (1) Continu : L'interaction continue analyse un geste d'après un mouvement continu. Ce type d'interaction utilise la dynamique des gestes et peut être conciliée avec un vocabulaire de geste (Roudaut nomme cela « langage gestuel ») ou un vocabulaire de geste assisté par « des widgets pour accompagner l'utilisateur dans son geste ». C'est ce que ce Roudaut appelle un langage gestuel hybride.
- (2) Discret : Ce type d'interaction repose sur des valeurs booléennes. Le geste est réduit à un déclencheur d'une touche de clavier ou d'un actionneur quelconque.
- (3) Capteur de mouvement : L'interaction basée sur les capteurs de mouvement utilise les technologies directement intégrées dans les dispositifs numériques.

En ce qui concerne la modalité de sortie kinesthésique. Roudaut observe deux catégories. La première catégorie définit les retours tactiles. Ils permettent aux utilisateurs de « percevoir des états de surface, des températures, des glissements ou des détections d'arêtes ». La seconde catégorie concerne les retours d'efforts qui permettent de percevoir « des forces de contact, de dureté, de poids ou d'inertie d'un objet ».

Le travail de Maria Karam intègre la compétence kinesthésique en modalité d'entrée en la décrivant avec les mêmes spécificités. Mauricio Cirelli précise les deux principales modalités d'entrées sur une surface tactile : le single-touch et le multi-touch. Enfin, Mathias Baglioni propose, en plus des technologies d'entrées et de sorties, la notion complémentaire de contexte qu'il divise en trois facteurs : l'utilisateur, la plate-forme et l'environnement. Pour cette dimension, la plate-forme est une information décrivant le type d'objet utilisé pour l'interaction, par exemple un téléphone mobile. Nous détaillerons dans les dimensions correspondantes les deux autres facteurs (cf. 2.1.2.B & 2.1.2.C).

B Identification

<i>Dimension</i>	Identification	
<i>Caractérisation</i>	<i>Caractéristiques</i>	
Christophe Schollers	Identificateur (curseur)	
Mauricio Cirelli	Nombre de doigts	
	Single-touch Multi-touch	Nombre d'utilisateurs
		Individuel Collectif
Mathias Baglioni	(Contexte) Utilisateur	

Figure 29. Caractéristiques constitutives de la dimension sur l'identification des gestes numériques.

L'identification correspond à l'affectation d'un indice permettant de créer le lien entre l'utilisateur et chaque nouveau geste réalisé par le biais d'un membre (doigt, main, bras, etc.) sur une interface informatique (cf. Figure 29). Nous présentons l'identification en nous appuyant sur les travaux de Christophe Schollers (Schollers et al. 2011), Mauricio Cirelli (Cirelli and Nakamura 2014) et Mathias Baglioni (Baglioni, Lecolinet, and Guiard 2009).

Christophe Schollers propose un guide pour concevoir des interactions gestuelles sur des surfaces tactiles. Il détermine le geste numérique d'après cinq caractéristiques : l'identificateur, la position, le mouvement, le temps et les états (chacune d'elle est détaillée dans la dimension correspondante). L'identificateur, ou curseur, est nécessaire aux techniques de reconnaissance algorithmique. En effet, comme nous l'avons vu précédemment (cf. 2.1.1), il ne peut pas y avoir d'interaction sans identification. Le processus opère ainsi : dès qu'il y a un contact sur la surface interactive, le système informatique crée une liste. Il identifie le doigt en lui attribuant un numéro d'identification qu'il ajoute automatiquement à la liste. Dans le cas d'une interaction impliquant plusieurs doigts, à chaque nouvelle entrée dans le système un nouvel identificateur apparaît. La liste s'efface une fois que tous les doigts quittent la surface.

Mauricio Cirelli spécifie deux principales informations relatives à l'identification sur des surfaces tactiles. D'une part, comme nous l'avons vu avec l'article de Christophe Schollers il y a le nombre de doigts (et par extension de mains). D'autre part, il peut y avoir une information permettant d'identifier l'utilisateur par rapport à un collectif. Cette dimension du geste nous intéresse dans la mesure où le cockpit est un milieu partagé entre deux pilotes.

Enfin, comme nous l'avons présenté dans la dimension précédente, Mathias Baglioni propose la notion de contexte qu'il associe à trois facteurs : utilisateur, plate-forme et environnement. Nous avons fait le choix d'associer le facteur utilisateur à l'identification parce qu'il décrit le constat suivant : l'utilisateur est une « personne pouvant utiliser un

dispositif mobile » qui a besoin d’avoir un retour d’information « clair (non ambigu) et facilement interprétable ». Ce phénomène fait écho aux règles de conception cf. 2.1.1.C.).

C Coordonnées

<i>Dimension</i>	Coordonnées	
<i>Références</i>	<i>Caractéristiques</i>	
Christophe Schollers	Position	
	x	y
Mauricio Cirelli	Spatialisation de l'interaction	Degrés de liberté
	Sur la surface	Autour de la surface
Mathias Baglioni	(Contexte) Environnement	

Figure 30. Caractéristiques constitutives sur les coordonnées des gestes numériques.

Les coordonnées indiquent spatialement l’emplacement des gestes numériques (cf. Figure 30). Comme pour l’identification, nous utiliserons les travaux de Christophe Schollers (Schollers et al. 2011), Mauricio Cirelli (Cirelli and Nakamura 2014) et Mathias Baglioni (Baglioni, Lecolinet, and Guiard 2009).

Christophe Schollers travaille sur des surfaces tactiles. Ils proposent donc de définir les coordonnées selon la position de l’identificateur sur les axes x et y. Mauricio Cirelli assimile les coordonnées aux degrés de liberté de la main (cf. 2.1.1.B.). Dans le cas de Schollers, il s’agit des interactions en 2D. Cirelli ajoute à la dimension des coordonnées les interactions en 3D avec l’usage de l’axe z (cf. 2.1.1.A). En conséquence, le cadre spatial de l’interaction peut se limiter au contact tangible de la surface ou inclure la zone autour de la surface.

Mathias Baglioni détermine la notion de contexte associée à l’environnement. L’interaction gestuelle se produit dans un environnement toujours particulier avec ses propres contraintes, cette espace « dont dispose l’utilisateur contraint ses mouvements et donc l’amplitude des gestes qu’il peut effectivement réaliser ».

D Temporalité

<i>Dimension</i>	Temporalité	
<i>Références</i>	<i>Caractéristiques</i>	
Christophe Schollers	Temps	
	Contact (début)	Relâché (fin)
Mauricio Cirelli	Temporalité	
	Atomique	Séquentielle
Mathias Baglioni	Discret	Continu

Figure 31. Caractéristiques constitutives de la dimension sur la temporalité des gestes numériques.

La temporalité détermine le geste numérique d'après des marqueurs temporels de début et de fin. L'écart entre ces deux marqueurs renseigne sur une durée qui peut être assimilée à la dimension de la temporalité (cf. Figure 31). Nous présentons cette dimension en utilisant à nouveau les travaux de Christophe Schollers (Schollers et al. 2011), Mauricio Cirelli (Cirelli and Nakamura 2014) et Mathias Baglioni (Baglioni, Lecolinet, and Guiard 2009).

Dans le domaine de l'interaction tactile, Christophe Schollers décrit la dimension du temps d'après deux marqueurs temporels : l'instant de contact où le geste numérique débute et l'instant de relâché qui détermine la fin du geste. Entre ces deux instants, il est possible d'associer un chronomètre. Mauricio Cirelli intègre la notion de séquence gestuelle. Lorsqu'il y a un geste numérique seul, on parle de geste atomique alors qu'un ensemble de geste correspond à une séquence. Par rapport au chronomètre, il débute avec le premier contact du premier geste et s'interrompt avec le relâché du dernier geste.

Mathias Baglioni met en relation la temporalité avec le retour d'information. Il propose deux catégories de type de contrôle : le contrôle discret et le contrôle continu. Dans le premier cas, le retour d'information se fait une fois le geste accompli. A l'inverse le contrôle continu représente l'information pendant l'accomplissement du geste.

E Mouvement

<i>Dimension</i>	Mouvement								
<i>Références</i>	<i>Caractéristiques</i>								
Christophe Schollers	Mouvement								
	Vitesse x			Vitesse y			Opérateurs de direction (360°)		
Mauricio Cirelli	Complexité de la trajectoire								
	Ouverte			Fermée			Croisée		
Mathias Baglioni	Impulsif				Fluide				
Ian M. Bullock	Sans contact avec un objet tangible		Avec contact avec un objet tangible						
			Sans préhension				Avec préhension		
	Sans mouvement	Avec mouv. * sans posture	Avec mouv. et posture	Avec mouv. et posture sans contact	Avec mouv. et posture en contact	Sans mouv.	Avec mouv. sans posture	Avec mouv. et posture sans contact	Avec mouv. et posture en contact

* mouv. : mouvement

Figure 32. Caractéristiques constitutives de la dimension sur le mouvement des gestes numériques.

Le mouvement d'un geste numérique correspond au déplacement d'un membre (doigt, main, bras, etc.) dans l'espace et dans le temps. Pour fonctionner, le mouvement requiert les trois dimensions précédemment énoncées : Identification (B), Coordonnées (C), Temporalité (D). Nous utilisons les travaux de Christophe Schollers (Schollers et al. 2011), Mauricio Cirelli (Cirelli and Nakamura 2014), Mathias Baglioni (Baglioni, Lecolinet, and Guiard 2009) et Ian M. Bullock (Bullock and Dollar 2011) (cf. Figure 32).

Sur une surface tactile, Christophe Schollers présente deux caractéristiques au mouvement : la vitesse et la direction. La première met en avant la temporalité du mouvement tandis que la seconde s'occupe des coordonnées. Mathias Baglioni observe deux types de mouvement associés à la vitesse :

- Impulsif : Ce sont des mouvements ponctuels avec de fortes variations d'accélération.
- Fluide : Ce sont des mouvements lents avec de faibles variations d'accélération.

En ce qui concerne la direction, Mauricio Cirelli parle de trajectoire et en propose trois types : ouverte, fermée, croisée. La trajectoire ouverte correspond à une ligne continue dessinée entre le contact et le relâché, par exemple pour former le numéro 2. Pour réaliser une trajectoire fermée il faut que ces deux marqueurs temporels soient à la même position, par exemple pour former le numéro 0. Enfin, le chevauchement d'une ligne hors relâché produit une trajectoire croisée, par exemple pour former le symbole &.

Dans le domaine de la robotique, Ian M. Bullock propose une classification des gestes basée sur la manipulation d'objets tangibles. Il présente les différents types de mouvement associés aux contacts des objets (cf. Figure 33).

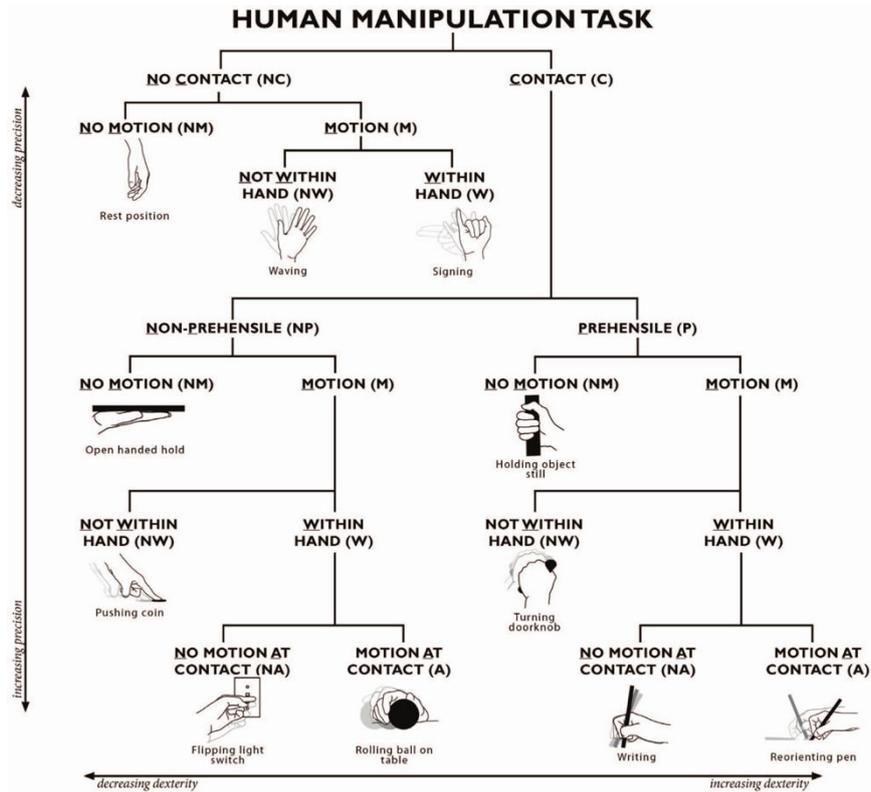


Figure 33. Classification des gestes par Ian M. Bullock.

Il y a deux principales familles d'interactions avec les objets : avec et sans contact. Nous focaliserons notre intérêt sur les interactions avec contact puisque nous avons jusqu'ici assez peu abordé ce type de relation. Au sein de cette famille, il y a le rapport préhensile et non-préhensile. La préhension est la capacité de manipuler un objet en le saisissant. Bullock différencie le mouvement de la main de son effet sur l'objet. C'est-à-dire, lorsqu'un utilisateur agit sur un objet en réalisant un mouvement, on peut discriminer les gestes par l'effet qu'aura le mouvement sur celui-ci, par exemple actionner un bouton n'est pas considéré comme un mouvement tandis que faire rouler une balle l'est. Bullock associe deux variables dans la performance de l'action qui sont la précision de l'action et la dextérité de l'utilisateur. La manipulation d'un crayon demande à l'utilisateur un fort niveau de maîtrise à l'inverse d'un geste de salutation.

F Statut

<i>Dimension</i>	Statut
<i>Référence</i>	<i>Caractéristiques</i>
Christophe Schollers	Etats
	Apparaît : Mouvement : Disparaît

Figure 34. Caractéristiques constitutives de la dimension sur le statut des gestes numériques.

Le statut est un indicateur sur l'état du geste numérique. Christophe Schollers (Schollers et al. 2011) propose l'état en cohérence avec les dimensions d'identification, de coordonnées et de temporalité (cf. Figure 34). Le geste numérique au niveau atomique possède au minimum deux états : apparaît et disparaît. L'apparition déclenche les informations identification, de coordonnées et de temporalité. La disparition permet de clôturer l'interaction du geste numérique. Entre les deux, l'état du mouvement peut être considéré en fonction des besoins de conception. Il correspond à l'exécution du geste en action avec les variations des informations associées.

G Fonctions

<i>Dimension</i>	Fonction							
<i>Références</i>	<i>Caractéristiques</i>							
Mauricio Cirelli	Sémantique							
	Symbolique			Manipulation directe				
Maria Karam	Déictic	Gesticulation	Manipulation			Sémantique		Langage des signes
			Contact en 2D		Contact en 3D	Sans contact en 3D	Dynamique	
			Avec 2 degrés de liberté	Avec > 2 degrés de liberté				
Mathias Baglioni	Physique	Métaphorique		Symbolique		Arbitraire		
Dautenhahn Nehaniv	Pointages	Non pertinents	Effets d'expressivité comportementales			Symboliques	Interactifs	
Justine Cassell	Déictique	Iconique		Métaphorique		Battement		
Claude Cadoz	Ergotique	Sémiotique	Epistémique	Geste d'excitation	Geste de modulation	Geste de sélection		
David Sturman	Naturalité		Adaptabilité			Dextérité		

Figure 35. Caractéristiques constitutives de la dimension sur la fonction des gestes numériques.

La fonction est une dimension complexe à définir du fait de sa diversité d'interprétation. Nous proposons de la définir ainsi : elle correspond au rapport entre l'intention de l'utilisateur et la forme qu'il emploie gestuellement pour la transmettre. Elle implique des savoirs sur le comportement de l'individu. Cette dimension gestuelle demande aux concepteurs en Interaction Humain-Machine de travailler avec des connaissances

produites en sciences humaines et sociales, puis de les intégrer à leurs problématiques. La quantité de classification, caractérisation et autres travaux pour définir les fonctions ou natures des gestes, rend complexe une compréhension homogène. Nous avons sélectionné sept travaux avec des motivations différentes pour couvrir le plus large spectre des fonctions des gestes (cf. Figure 35). Bien que certains travaux aient déjà été cités, nous les présentons à nouveau afin d'en montrer la diversité. Les travaux de Mauricio Cirelli (Cirelli and Nakamura 2014) et Mathias Baglioni (Baglioni, Lecolinet, and Guiard 2009) sont des guides de conception basés sur les possibilités technologiques des surfaces tactiles pour le premier et des dispositifs mobiles pour le second. La classification des interactions gestuelles par Maria Karam (Karam and Schraefel 2005) est un état de l'art sur la diversité des travaux réalisés dans le domaine de l'IHM. Les caractérisations de Dautenhahn Nehaniv (Nehaniv et al. 2005), Justine Cassell (Cassell 1998), Claude Cadoz (Cadoz 1994) et David Sturman (Sturman 1992) font le lien entre les SHS et l'IHM en proposant des caractérisations adaptées pour concevoir des gestes numériques. Dautenhahn Nehaniv propose une classification des fonctions d'après la notion d'intentionnalité des gestes. Justine Cassell s'est penchée sur les gestes « spontanés ». À l'inverse des gestes intentionnels, les gestes spontanés sont réalisés de manière inconsciente par l'individu. Ils accompagnent ou non la parole et ils sont difficilement modélisables puisqu'ils sont produits inconsciemment. Enfin Claude Cadoz et David Sturman proposent des fonctions sur la technicité des gestes, Cadoz en définissant la main comme générateur d'information mais également comme récepteur, et Sturman en abordant la notion de naturalité du geste.

Fonction sémiotique

Claude Cadoz décrit cette fonction ainsi : « La composition d'un geste peut générer un message, une information à destination d'un capteur, d'un individu, ou plus largement d'un environnement ». Pour Mauricio Cirelli le geste numérique à identifier est forcément sémiotique. Il distingue deux sous-fonctions : symbolique et à manipulation directe. Les gestes symboliques correspondent à la définition donnée par Claude Cadoz pour la fonction sémiotique. Ces formes peuvent être réalisés en respectant des trajectoires ou des configurations de placement de doigts ou de mains sur les interfaces. Les gestes à manipulation directe constituent tous les autres gestes (e.g. drag and drop, swipe, touch, move). Dans l'article de Maria Karam on retrouve cette fonction sous la dénomination « sémantique » avec une distinction entre trois types de geste : dynamique (mouvement), statique (à l'inverse, sans mouvement du bras ou du corps, juste indication d'information par la posture de la main par exemple) et « stroke » (contact bref, par exemple : toucher un écran ; cette sous-fonction est identique à la manipulation directe proposée par Cirelli). À la place de la dénomination « sémantique » ou « sémiotique », Mathias Baglioni et Dautenhahn Nehaniv utilisent le terme « symbolique ».

Fonction déictique

On retrouve chez Maria Karam et Justine Cassell la fonction déictique. Dautenhahn Nehaniv utilise le terme pointage. Ces gestes sont utilisés pour indiquer spatialement une information. L'individu tend l'un de ses bras vers une direction relative à l'information qu'il cherche à montrer. Justine Cassell note que ce type de geste peut être accompagné d'un discours.

Fonction iconique

D'après Justine Cassell ces gestes sont utilisés pour décrire des actions ou des situations. Ils accompagnent majoritairement les discours et servent à représenter gestuellement les actions. Ce sont par exemple des gestes utilisés pour décrire le processus de manipulation d'un objet en mimant chaque étape.

Fonction métaphorique

Justine Cassel et Mathias Baglioni évoquent cette fonction. A l'inverse des gestes iconique, ces gestes « associent deux termes appartenant à des champs lexicaux différents » (Baglioni, Lecolinet, and Guiard 2009). Un exemple de geste métaphorique consiste à faire glisser une page en inclinant l'écran d'un téléphone dans une direction. Ils ne sont pas inspirés par des « formes physiques » (Cassell 1998, 4).

Fonction de manipulation

Il y a les gestes qui « servent à manipuler » (Baglioni, Lecolinet, and Guiard 2009) des objets. Pour Mathias Baglioni il s'agit de la fonction physique. Maria Karam utilise le terme manipulation. Maria Karam propose cinq spécificités qui reprennent les critères propres aux modalités d'entrées. Les gestes avec deux degrés de liberté pour des interactions en 2D (e.g. déplacer un objet avec une souris d'ordinateur). Les gestes avec degrés multiple (>2) de liberté pour des interactions en 2D (e.g. faire un zoom de la main sur un écran tactile). Les gestes sur des interacteurs tangibles pour des interactions en 3D (e.g. manipuler un joystick pour contrôler un avion). Enfin les gestes libres sans contraintes à manipulation d'objets à distance (e.g. déplacer un objet par un mouvement du bras sans contact physique avec une surface).

Claude Cadoz propose la fonction ergotique. La main agit sur la matière et y transmet l'énergie de l'utilisateur. Ces gestes accomplissent des actions comme : transformer, modeler, façonner, transporter, usiner, casser, briser, fendre. Cadoz parle de « transduction ». Nous associons sa fonction à la fonction de manipulation car elle décrit un rapport d'interaction avec la matière.

Fonction interactive

Dautenhahn Nehaniv fait mention des gestes qui permettent de construire et d'organiser le travail collaboratif. Ce sont des gestes établis socialement entre les membres d'un collectif.

Fonction arbitraire

Mathias Baglioni propose la fonction arbitraire. Ce sont tous les gestes qui ne sont pas «évidents à comprendre parce qu'ils ne s'inspirent pas d'une quelconque réalité physique ou culturelle ». Il prend comme exemple un utilisateur qui secoue trois fois son écran pour éteindre une fenêtre.

Fonction épistémique

C'est ce que l'on assimile fréquemment à la définition du sens « toucher ». Avec ses capteurs, l'intérieur de la main dans sa globalité est un organe permettant par sa sensibilité d'informer sur les changements de température et sur l'état de surface des différentes matières. C'est le cas en particulier de l'extrémité des doigts : les dernières phalanges sont une « sorte de fovea tactile » (Cadoz 1994). La main rend compte également grâce à sa fonction tactilo-kinesthésique (haptique) d'informations sur l'essence d'un objet : sa forme, son orientation, sa grandeur, etc (par exemple, c'est grâce à cela que l'aveugle peut percevoir l'objet). Ces récepteurs définissant la fonction proprioceptive de la main renseignent également sur le mouvement, la trajectoire, le poids de l'objet manipulé. Ces récepteurs sont présents dans les articulations de la main et reliés aux récepteurs vestibulaires (oreille interne).

Fonction instrumentale

C'est une fonction développée spécifiquement par Claude Cadoz dans le cadre de son projet de « geste instrumental ». Il propose trois types de fonction associées au geste. Le geste instrumental est un geste qui réunit les fonctions ergotique, épistémique et sémiotique. Il concerne la relation entre un musicien et son instrument de musique. Claude Cadoz relève d'abord le geste d'excitation où le musicien fournit l'énergie à l'instrument. Cela correspond à la genèse du phénomène sensible. Puis, il y a le geste de modulation où le musicien modifie les caractéristiques de l'instrument. Enfin, il y a le geste de sélection où le musicien agit sur un élément particulier, de façon brève et indépendamment d'une séquence gestuelle (e.g. donner le « la » pour accorder les instruments).

Fonction gesticulation

Maria Karam présente la fonction de gesticulation. Il s'agit de tout mouvement du corps qui n'est pas associée à une intentionnalité de la part de l'utilisateur. Lorsqu'elle s'accompagne de la parole, Justine Cassel assimile cette fonction à ce qu'elle nomme battement. Dautenhahn Nehaniv parle plutôt d'effets d'expressivité comportementales. Ils

considèrent que même si ces mouvements ne sont pas produits consciemment par l'utilisateur, ils permettent d'accentuer des propos dans le discours et peuvent renseigner sur son état d'humeur. Enfin, lorsqu'il n'y a pas de parole, Dautenhahn Nehaniv utilise le terme « irrelevant » pour décrire cette fonction. Il s'agit alors des gestes relevant des réflexes ou des troubles obsessionnels compulsifs.

Fonction naturalité

La naturalité correspond à ce qui est « déjà pré-appris » (Sturman 1992, 27) chez l'utilisateur avant de réaliser une interaction. En d'autres termes, cela correspond à ce qui est « enraciné dans le comportement » de l'utilisateur grâce à l'exécution de manipulation quotidienne sur des objets familiers. Un geste numérique doué de cette fonction est réalisable rapidement, sans beaucoup d'entraînement, et avec aisance. Il est « intuitif ». David Sturman présente le lien entre la parole et la réalisation des gestes, il l'assimile à cette fonction.

Fonction adaptabilité

David Sturman présente l'adaptabilité des gestes numériques comme étant la possibilité morphologique et mécanique de mouvements d'après les contraintes des degrés de liberté.

Fonction dextérité

La dextérité est pour David Sturman, la capacité permettant d'accomplir un geste avec un haut niveau de technicité sur un objet. A l'inverse de la naturalité cette compétence requiert de l'apprentissage avec un effort non négligeable de la part de l'utilisateur pour maîtriser le geste numérique souhaité.

Notre agencement des fonctions et de leurs spécificités est arbitraire, tout comme le choix des dénominations. Par exemple, nous avons utilisé le terme fonction « gesticulation » plutôt que « non pertinent » parce qu'il est plus utilisé dans la littérature. L'usage de termes différents pour signifier les mêmes phénomènes rend complexe la compréhension des fonctions pour les concepteurs (Barbé, Mollard, and Wolff 2014). En outre, la variété des fonctions montre l'étendue de la richesse comportementale des gestes.

H Conclusion

Ce travail d'analyse de la littérature, que nous avons qualifié de réflexive (définitions explicites des gestes numériques par l'établissement de cadres de caractérisations utiles à la conception d'interactions gestuelles), nous a permis d'identifier huit dimensions : modalités d'entrée (A), modalités de sortie (A), identification (B), coordonnées (C), temporalité (D), mouvement (E), statut (G), fonction (F). Les articles de cet état de l'art ont été sélectionnés pour couvrir une large diversité d'intentions. Par rapport aux études orientées vers les contraintes techniques des dispositifs de capture comme l'étude de Mauricio Cirelli (Cirelli

and Nakamura 2014) ou Christophe Scholliers (Scholliers et al. 2011), nous avons favorisé le domaine de l'interaction sur surface tactile, en accord avec nos besoins techniques par rapport à notre futur travail de design (cf. chapitres 5 et 6).

2.1.3 Discussion

Nous avons présenté des travaux de caractérisation, produits dans le domaine de l'Interaction Humain-Machine, dont les intentions ont produit tantôt des définitions dites implicites (cf. 2.1.1), tantôt des définitions dites explicites (cf. 2.1.2). Les définitions implicites délimitent les gestes aux contraintes technologiques des dispositifs d'interactions. Les concepteurs cherchent à « façonner » artificiellement le geste humain comme un objet modélisé et numérique à part entière. Le geste numérique y est défini d'après déduction suivant l'analyse des contraintes à respecter pour permettre à l'interaction d'exister et d'être performante d'après des critères d'utilisabilités. Les secondes définitions sont produites de manière réflexive, c'est-à-dire en analysant les premiers travaux et en énonçant des listes de dimensions propres aux gestes numériques. L'état de l'art nous a permis d'en identifier huit dont la dimension est associée aux fonctions. Cette dimension et la notion d'utilisabilité montrent une tension dans la conception des interactions gestuelle par rapport à la définition des gestes numériques. La performance d'une interaction dépasse le cadre de l'informatique et implique des savoirs issus d'autres disciplines des sciences humaines et sociales. Wobbrock précise ce constat en énonçant que les conceptions des gestes numériques sont « issus de choix de conception arbitraire guidés par des contraintes techniques et qu'ils s'accordent rarement avec le comportement de l'utilisateur » (Wobbrock, Morris, and Wilson 2009). C'est pourquoi, avant d'analyser les gestes des pilotes, nous proposons une étude focalisée sur l'étude du comportement sociotechnique de l'individu afin d'améliorer la qualité de notre observation.

2.2 LE GESTE, TEMOIN DU COMPORTEMENT HUMAIN

Pour rappel, l'intention générale de ce chapitre est de nous permettre de définir de quoi sont composés les gestes pour pouvoir les représenter sur les afficheurs des pilotes afin d'assurer une bonne conscience mutuelle. Nous avons précédemment analysé la composition des gestes numériques par le prisme technologique de la machine. En réfléchissant tout particulièrement à la dimension sur les fonctions (3.1.2.G) nous pensons qu'il est important d'aborder le geste numérique en décrivant l'aspect technique du geste intrinsèque à l'homme, c'est-à-dire, d'un point de vue sociotechnique. Nous analyserons d'abord une méthode de design pratiqué en IHM mais qui place l'utilisateur au centre du processus de définition des gestes numériques sans connaissances particulières des contraintes technologiques (cf. 2.2.1). Ensuite, nous poursuivrons avec une étude comparative sur la sémantique des termes associées aux gestes afin d'étendre nos dimensions des gestes (cf. 2.2.2). Puis nous présenterons des traits caractéristiques des gestes techniques d'abord en lien avec la parole (cf. 2.3.3) puis avec le contrôle (cf. 2.3.4) et la rythmique (cf. 2.3.5). Au terme de cette analyse, nous serons aptes à observer avec

efficacité les gestes des pilotes afin d'engager avec précision le choix des dimensions des gestes à représenter.

2.2.1 Laisser les utilisateurs concevoir leurs gestes numériques

Wobbrock (Wobbrock, Morris, and Wilson 2009) développe une méthodologie basée sur l'élicitation (*Guessability*) afin de ne plus définir les gestes d'après les besoins technologiques mais plutôt en fonction des intérêts des utilisateurs. Ils invitent des participants non-experts à imaginer des gestes numériques par rapport à des actions physiques (e.g. déplacer un objet, prendre un objet, agrandir). L'objectif est de produire des gestes numériques qui feraient « sens d'un point de vue comportemental ». A l'issue de l'étude, un vocabulaire est créé. Il comprend 1080 propositions gestuelles. La proposition de Wobbrock est intéressante d'abord pour l'émergence de ces formes gestuelles par l'établissement d'une nouvelle méthode de design. Ensuite parce qu'elle est une proposition d'envisager le geste non pas en tant que qu'objet technique construit et tributaire des possibilités technologiques de la machine mais en tant qu'élément d'abord humain. Néanmoins, en ce qui concerne la notion de « sens », l'étude de Meredith Morris (Morris et al. 2014) démontre que les utilisateurs non-experts sont influencés socialement (e.g. entourage social, média) par les dispositifs numériques même s'ils ne les manipulent pas. Ce sont des « biais d'héritages ».

2.2.2 Définitions des gestes en Sciences Humaines et Sociales

L'étude lexicale des définitions permet d'identifier la signification culturelle des termes associés au geste puisque chaque interprétation est relative à la « réalité » de chaque communauté (Dubois, Klumpp, and Morel 2002). En effet, le geste est porteur d'un nombre important de significations, Dubois présente une série de caractéristiques associées au geste d'après cinq dictionnaires de la langue française (Littré 1994; Imbs 1977; Alain Rey 1992; A. Rey 1998; Rey-Debove and Rey 2000). Les résultats de leur étude montrent que les définitions sémantiques du geste renvoient très fréquemment aux termes : mouvement et action. Par exemple, « Geste : 1. L'action et le mouvement du corps, particulièrement des bras et des mains, action et mouvement employés à signifier quelque chose » (Littré 1994). A l'inverse, le terme geste n'apparaît presque pas dans les définitions des termes mouvement et action (cf. Figure 36).

Terme d'entrée	Geste	Action	Mouvement	
Terme donné dans la définition				<i>total</i>
<i>Geste</i>	-	3	2	5
<i>Action</i>	10	-	8	18
<i>Mouvement</i>	13	12	-	25

Figure 36. Citations d'un terme par un autre dans les définitions des dictionnaires (tableau produit par Dubois).

Pour ces trois termes (mouvement, action, geste), Dubois propose des caractéristiques sémantiques associées. Ils apparaissent en italique ci-dessous.

Le mouvement correspond au *changement de position*, dans un *espace de référence spatial et temporel*, soit d'un *corps animé* (e.g. individu qui marche) ou d'une *de ses parties* (e.g. une jambe), soit d'un *objet inanimé* (e.g. une pierre).

L'action est définie comme la *production d'un effet* par un *agent animé ou inanimé* (e.g. la pluie). Cet effet peut être *observable ou mesurable*. Il est possible d'associer l'action à une *intentionnalité*, à une *durée* ou à un *résultat*.

Le geste désigne un mouvement d'un *corps animé* ou d'une *de ses parties*. Il peut être porteur de *signification* et d'*intentionnalité* pour produire une action. Il peut être associé à une *attitude*.

Ces caractéristiques sont nombreuses et peuvent être associées, corrélativement à la situation, au geste. Par exemple, la notion d'intentionnalité est commune au geste et à l'action. Cependant si l'on prend uniquement le geste, elle n'implique pas nécessairement la production d'un effet ou d'un résultat. Le danseur associe le geste à son corps et à ses mouvements. L'intentionnalité est relative au type de danse qu'il pratique (e.g. ballet, danse contemporaine). L'artisan évoque le geste d'après la production d'un effet sur la matière et sur son résultat. Par exemple, l'ébéniste qui réalise une entaille s'intéresse à l'impact de son geste sur la matière plus qu'au mouvement du geste lui-même. Ce système confirme la dépendance de la définition par rapport à l'objet d'attention. Elle dépend de la « réalité » de l'individu. La définition des gestes est donc différente pour les pilotes et pour les informaticiens.

Cependant, puisque nous proposons de représenter des gestes par le prisme d'une interface numérique, nous proposons d'établir des ponts de compréhension entre ces deux réalités. C'est pourquoi nous proposons d'associer, lorsque c'est possible, ces caractéristiques à notre cadre conceptuel de dimensions des gestes (cf. Figure 37). Pour simplifier la compréhension, nous utiliserons le terme de trait.

Caractéristiques Mouvement	Caract. Action	Caract. Geste	Dimensions des gestes numériques
Corps / Partie du corps animé			Identification
Changement de position		Changement de position	Mouvement
Espace de référence spatial			Coordonnées
Espace de référence temporel / Durée			Temporalité
Objet inanimé			
	Production d'un effet		Statut
	Observable / Mesurable		
	Résultat		
	Intentionnalité		Fonction
	Porteur de signification		
	Attitude		
			Modalité d'entrée
			Modalité de sortie

Figure 37. Les trois colonnes de gauche présentent les caractéristiques pour chaque terme. La colonne de droite indique la similitude entre ces caractéristiques et les dimensions des gestes numériques.

La définition du terme mouvement implique les traits : *changement de position, espace de référence spatial, corps animé ou une de ses parties, objet inanimé*. Vis-à-vis de notre cadre conceptuel, le trait du *corps animé ou une de ses parties* est semblable à notre compréhension de la dimension identification puisqu'il s'agit pour le dispositif numérique d'identifier un sujet de cette nature pour déclencher le processus de reconnaissance gestuelle. Le trait, *changement de position* est semblable à notre dimension sur le mouvement. *L'espace de référence spatial* renvoie à la dimension sur les coordonnées de même que le trait *espace de référence temporel* correspond à notre compréhension de la dimension sur la temporalité. Enfin, nous avons décidé de ne pas conserver le trait sur *l'objet inanimé*, puisqu'il est hors propos par rapport à notre travail. L'ensemble des traits sont indiqués directement dans les définitions sous le format italique.

Concernant la définition du terme action nous relevons : *production d'un effet, agent animé, objet inanimé, observable ou mesurable, intentionnalité, durée et résultat*. Pour les traits *production d'un effet, observable ou mesurable et résultat* nous les avons associés à la dimension sur le statut parce qu'ils renseignent sur l'état d'un geste. Le trait sur la *durée* est intégré à la dimension sur la temporalité. Enfin, au sujet du trait *intentionnalité*, nous l'avons associé à la dimension de la fonction.

Nous appliquons également la même démarche avec le dernier terme geste : *mouvement, corps animé ou d'une de ses parties, porteur de signification, d'intentionnalité, action, attitude*. Les traits mouvement et action ont déjà été analysés en tant que termes distincts. Nous avons associé aux traits *porteur de signification, d'intentionnalité, et attitude* à la dimension de la fonction parce qu'ils font écho à la valeur sémiotique des gestes.

Nous n'avons trouvé aucun trait à associer aux dimensions modalité d'entrée et modalité de sortie. Ces modalités font partie du cadre uniquement informatique. Ils n'ont pas de signification en dehors de ce cadre pour la définition des gestes. Ce travail d'association nous permet d'éliminer ces deux dimensions pour la représentation graphique à l'attention des pilotes dans la mesure où elles ne représentent pas le geste en dehors des problématiques de concepteur en informatique. Cette comparaison valide l'établissement de nos dimensions puisque chaque trait peut être représenté par au moins une dimension.

2.2.3 Définir le geste par rapport à la parole

L'anthropologue Adam Kendon a construit sa définition des gestes en partant d'un constat. En analysant la définition du *Oxford English Dictionary* sur le geste : « Un mouvement du corps ou d'une partie de celui-ci qui exprime une idée ou une sensation » (Adam Kendon 1997, p109) il expose un problème majeur. Dans cette définition, l'intentionnalité de l'individu est un facteur décisif pour qualifier ce qui relève d'un geste de ce qui n'en relève pas. Néanmoins, « Si quelqu'un commence à exploser de colère, éclate de rire à ce que quelqu'un dit [...], ces expressions ne sont pas communément considérées comme des gestes. Néanmoins il n'est pas possible de spécifier où se situe la limite entre ce qui est un geste et ce qui n'en est pas » (Adam Kendon 1997, p109). Ce fait est intéressant car il montre que malgré le détachement des contraintes technologiques propres à l'Interaction Humain-Machine, les anthropologues ont le même problème pour déterminer les gestes. Adam Kendon propose comme solution de définir le geste d'après la parole. « Pour qu'une action soit qualifiée de « geste » elle doit posséder des caractéristiques qui la font ressortir comme tel » (A Kendon 2004, p10). Pour décrire ces caractéristiques, il met en place ce qu'il appelle le continuum de Kendon. Il y a quatre catégories : (1) La gesticulation, les mouvements du corps accompagnent le discours sans être rationnellement explicables ; (2) Les emblèmes, ce sont des gestes signifiants comme « bonjour » par exemple, qui peuvent être accompagnés optionnellement de la parole ; (3) Les pantomimes, ces gestes simples remplacent l'usage de la parole ; (4) Le langage des signes, ce sont des gestes complexes qui forment un langage fonctionnant au même titre que la parole.

Les sociologues Angela Di Pastena et Loris Tamara Schiaratura définissent plus largement les gestes comme des mouvements des membres supérieurs qui « entretiennent une relation privilégiée avec le discours. Ils sont alors qualifiés de co-verbaux et ont une double fonction, à la fois sémantique et pragmatique. D'une part, ils contribuent, en relation avec les mots, à la construction et à la transmission des significations. Ils apportent des idées complémentaires à celles évoquées par le discours, et favorisent la production du discours en facilitant l'accès au lexique. Ils participent à l'effort de verbalisation du locuteur en

redondance ou en complémentarité avec l'expression verbale ou en compensant un déficit verbal. Mais ils participent également à la régulation de l'interaction et de l'échange verbal. Ils jouent un rôle de signe pour le partenaire et favorisent la compréhension du message. » (Di Pastena, Tamara Schiaratura, and Askevis-Leherpeux 2015, p465).

2.2.4 Apprendre pour contrôler ses mouvements

Leroi-Gourhan évoque le fait que « tout ce qui est agi par le sujet entre dans un comportement opératoire, mais sous des formes et avec des intensités très différentes suivant qu'il s'agit de pratiques élémentaires et quotidiennes, de pratiques à périodicité plus espacée ou de pratiques exceptionnelles » (Andre Leroi-Gourhan 1965, p28). L'apprentissage se fait d'abord par souci de « survie sociale ». En effet, dès son plus jeune âge, l'apprentissage des « chaînes opératoires élémentaires » représente « les programmes vitaux de l'individu » (Andre Leroi-Gourhan 1965, p28). Il s'agit d'effectuer des actions élémentaires par le biais de « moyens élémentaires » (André Leroi-Gourhan 1943, p43). Il faut apprendre à réaliser des gestes de préhension et de percussion afin d'acquérir les « pratiques d'alimentation ou d'hygiène, gestes professionnels, comportement de relation avec les proches » (Andre Leroi-Gourhan 1965, p28). Cette phase de « dressage » (Andre Leroi-Gourhan 1965, p29) est indispensable pour la libération du cerveau afin de lui permettre d'exécuter une autre tâche pendant la manipulation. En d'autres termes, la maîtrise de ces chaînes opératoires machinales nous permettent de ne pas réfléchir à chaque instant à la manière de positionner nos doigts ou de déplacer nos articulations pour maintenir notre téléphone portable proche de notre oreille afin de nous intéresser plutôt à la conversation avec l'interlocuteur. Ce phénomène explique pourquoi les pilotes travaillent à mémoriser les actions à réaliser.

D'autre part, Henri Focillon écrit : « L'action de la main définit le creux de l'espace et le plein des choses qui l'occupent. Surface, volume, densité, pesanteur ne sont pas des phénomènes optiques. C'est entre les doigts, c'est au creux des paumes que l'homme les connut d'abord. » (Focillon 1943, 106). En effet, l'acquisition d'un geste technique est la conséquence d'un apprentissage long et dépendant de l'existence de l'individu par rapport au monde. C'est parce que l'individu ressent le monde qu'il peut apprendre à réaliser des gestes. Et c'est précisément parce qu'il ressent qu'il peut développer ses mouvements. En effet, « le seul moyen pour apprendre un mouvement est de le produire vraiment et de ressentir toutes les sensations qui permettront les corrections sensorielles » (Biryukova and Brill 2002, p60). L'individu doit d'abord éprouver le geste et cela de manière répétée. En effet, la répétition des mouvements lui permet de rencontrer en permanence de nouvelles situations. Le corps et ses capteurs proprioceptifs sont alors confrontés aux variations des facteurs intérieurs (e.g. degrés de liberté de la « charpente » (Leroi-Gourhan 1964, pp 86–87) comme extérieurs (e.g. surface des matières) incluant la maîtrise des mouvements afin d'être capable d'exécuter le geste adéquat lors d'un changement imprévu. Nicolai A. Bernstein parle de « répétition sans répétition » puisqu'aucun mouvement n'est identique. En effet, il n'est tout simplement pas possible de répéter exactement le même geste.

Lorsque les pilotes sont occupés à piloter, ils doivent à nouveau engager ce processus d'apprentissage tout en distinguant ce qui relève des sensations apprises dès leurs plus jeunes âges des nouvelles sensations. En réalisant une étude ethnographique avec des pilotes militaires, le sociologue Dubey constate au sujet de l'apprentissage du métier qu'il est « d'abord, celui du corps qui apprend à supporter d'être autant malmené, puis à reconnaître des sensations, à les distinguer les unes des autres de manière très subtile ; qui apprend aussi dans certains cas à déjouer ces mêmes sensations, » (Wobbrock, Morris, and Wilson 2009).

Le pilote est à la fois celui qui apprend les gestes techniques en tant qu'individu mais également celui qui conditionne ses mêmes gestes techniques. Il doit « éprouver dans son corps et reconnaître ces sensations, (ce sont) deux moments décisifs du processus d'appropriation. Ils prennent leur sens l'un par rapport à l'autre et doivent être pensés ensemble. Éprouver exprime l'idée de faire corps avec l'objet qui cesse d'être objet, il fait partie du corps du pilote. Reconnaître participe du processus d'objectivation, de remise à distance de l'objet, et de reconstruction de cette distance » (Dubey and Moricot 2006, 43).

2.2.5 Rythme et dextérité, des indicateurs de performance

Le contrôle des gestes passe aussi par la notion de dextérité propre à chaque individu. « Du Primate à l'Homme, les opérations de préhension ne changent pas de nature » il semble qu'elles « se développent en variété dans les buts et en finesse dans l'exécution » (Andre Leroi-Gourhan 1965, p38). Par cela Leroi-Gourhan présente la singularité de chaque geste. La nature du geste reste la même et elle est commune à tous les individus. Néanmoins son accomplissement est relatif aux compétences et à l'expérience de l'individu qui l'exécute. Cette obtention de dextérité n'est pas innée. Elle passe par une grande répétition d'un même mouvement accompagné, pour chaque réalisation, d'une intention adaptée. « Il faut faire beaucoup de choses pour savoir les faire ; il faut savoir faire beaucoup pour se considérer adroit » (Biryukova and Bril 2002, p65).

Dans leur étude sur les tailleurs de pierre en Inde, Roux et Bril montrent que la dextérité est corrélée au niveau d'expertise de l'individu. Elle est repérable dans la capacité d'être flexible face aux contraintes de la matière, dans celle d'adapter son énergie en la minimisant, et dans la gestion du rythme des actions et de leur intensité dans le but d'obtenir le résultat désiré. « Les non-experts sont apparus soit rigides, soit variables de manières plus ou moins aléatoire. Au contraire, les experts s'adaptent aux situations et leur variabilité peut être interprétée comme une adaptation optimale aux contraintes de la tâche. La capacité d'anticipation est visible dans l'ajustement de l'accélération du marteau au cours des flutages ainsi que dans la stabilité de la main posturale au moment du choc. La minimisation de l'énergie, associée à une grande flexibilité, caractérise un haut niveau d'expertise » (Roux and Bril 2002, p43).

Nous verrons lors de notre analyse de l'activité gestuelle des pilotes que percevoir la dextérité de l'autre traduit la part « singulière » du comportement de l'individu, notamment avec la perception du rythme gestuel lors des flots procéduraux. C'est une donnée

essentielle dans le contrôle des actions de l'autre, donc de la conscience mutuelle dans le pilotage.

2.2.6 Conclusion

L'analyse du geste technique d'un point de vue « sociotechnique » nous a permis d'enrichir nos connaissances sur le comportement gestuel dans le domaine de l'acquisition de la technique par l'individu. En complément du précédent sous-chapitre (cf. 2.1), nous avons déterminé un cadre conceptuel pour les gestes numériques. Ce cadre réuni d'une part la réalité technologique ou informatique et d'autre part la réalité technique ou sociotechnique. Nous avons identifié l'importance de la dextérité pour mesurer l'expérience et l'état cognitif de l'individu. A partir de ce cadre conceptuel, nous pouvons proposer une analyse pertinente pour identifier les dimensions des gestes des pilotes nécessaire à la conscience mutuelle.

2.3 ANALYSE DU COMPORTEMENT GESTUEL DES PILOTES

Après avoir étudié l'activité de pilotage (cf. chapitre 2), nous proposons une étude focalisée sur l'analyse des gestes physiques des pilotes afin de définir très spécifiquement « la réalité » des pilotes. Nous focalisons notre étude sur les gestes physiques et non numériques puisque les postes de pilotage dans lesquels nous avons pu réaliser nos observations n'étaient pas équipés d'écrans tactiles. Notre objectif dans ce sous-chapitre est d'identifier les dimensions des gestes physiques des pilotes nécessaire à la conscience mutuelle afin de définir nos variables d'entrées pour nos prochaines propositions de design (cf. chapitre 5 et 6). A l'issue de ce sous-chapitre, nous ferons la synthèse entre les dimensions numériques observées par la littérature scientifique en Interaction Humain-Machine, la littérature en Philosophie de la technique et notre analyse des gestes physiques spécifique aux pilotes d'avion de ligne.

2.3.1 Méthode

Nous avons établi une analyse de l'activité gestuelle des pilotes d'après la littérature spécialisée, des interviews contextualisées avec le projet Airtius et deux sessions d'observations (une en situations réelles et une en simulateur). Ces sessions représentent chacune un aller-retour (réel ou fictif) avec un nouvel équipage. Le premier aller-retour est exécuté dans les locaux de l'École Nationale de l'Aviation Civile (Toulouse) par un équipage d'élève pilote accompagné d'un instructeur sur un simulateur A320. Conçu par la société FAROS et mis en service le 30 septembre 2016, il possède la qualification FNPT 2-MCC (Flight Navigation & Procedure Trainer - Multi-Crew Cooperation) délivrée par les services de la Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile (DSAC). Le second aller-retour est exécuté par un équipage de la compagnie Transavia sur un Boeing 737-800. Les pilotes professionnels sont expérimentés. Ils ont à leur actif respectivement plus de 5000 heures de vol sur ce type d'appareil et plus de 10 000 heures en cumulant les autres expériences (ATR et pilotage en aéroclub). Nous noterons que pour les quatre vols, chaque pilote a occupé

pour la durée d'un vol complet la fonction de Pilot Flying (PF) et de Pilot Monitoring (PM). Chaque session a fait l'objet d'un enregistrement vidéo (8 heures).

Pour analyser ces gestes, nous avons construit une base de données selon plusieurs critères

- La temporalité (temps de départ, contact, fin et durée totale) ;
- La phase de vol (le pré-vol, le décollage, la montée, la croisière, la descente, l'approche et l'atterrissage) ;
- L'objet manipulé (panneau de contrôle, système avionique, contrôleur physique) ;
- L'identité de l'opérateur (grade et rôle) ;
- L'identité de la main (gauche ou droite) ;
- Le type de mouvement de la main et du bras durant l'opération : nous avons utilisé le système de Marc Chevaldonné (Chevaldonné, Mérienne, and Neveu 2006) parce qu'il couvre le spectre des interactions possibles sur des contrôleurs physiques dans le poste de pilotage. Dans l'ordre il y a :
 - Geste Simple 1^{ère} Catégorie Posture Simple (GS 1C PS) indique le déplacement par la position ou l'orientation de la main dans un espace en conservant une posture simple, c'est-à-dire lorsque les doigts sont soit complètement repliés ou étendus ;
 - Geste Simple 1^{ère} Catégorie Posture Complexe (GS 1C PC), à l'inverse de la première catégorie les doigts sont plus ou moins pliés ;
 - Geste Simple 2^{ème} Catégorie (GS 2C), la posture de la main évolue sans déplacement de position ou d'orientation ;
 - Geste Complexe (GC) indique un mouvement spatial par déplacement de position ou d'orientation de la main avec un changement de posture.
- Le type de fonction du geste, nous avons utilisé les fonctions Sémiotique, Épistémique et Ergotique de Claude Cadoz (Cadoz 1994) (décrite à cf. 2.1.3.F) ;
- Le rapport à la parole (avant l'action gestuelle, durant ou sans) ;
- Le contrôle visuel (regard sur le geste ou non pendant l'action).

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
	GRADE	ROLE	TIME START	TIME CONTACT	TIME FINISH	SUM	FLIGHT'S STAGE	SPACE	SYSTEM	INTERAC
	FO	PF				00:08:02	1 PREPARATION	OHP		
_1A	FO	PF	00:00:00	00:01:34	00:01:43	00:01:43	1 PREPARATION	OHP	FUEL PUMPS	SWITCH
_1B	FO	PF	00:01:43	00:02:05	00:02:05	00:00:22	1 PREPARATION	OHP	FUEL PUMPS	SWITCH
_1C	FO	PF	00:02:05	00:02:25	00:02:36	00:00:31	1 PREPARATION	OHP	FUEL PUMPS	SWITCH
_2A	FO	PF	00:02:36	00:03:08	00:03:22	00:00:46	1 PREPARATION	OHP	HYD PUMPS	SWITCH
_2B	FO	PF	00:03:22	00:03:33	00:03:43	00:00:21	1 PREPARATION	OHP	HYD PUMPS	SWITCH
_3A	FO	PF	00:03:43		00:04:35	00:00:52	1 PREPARATION	OHP		
_4A	FO	PF	00:04:35		00:05:22	00:00:47	1 PREPARATION	OHP	ANTI COLLISION	SWITCH
_4B	FO	PF	00:05:22	00:06:28	00:06:36	00:01:14	1 PREPARATION	OHP	WHEEL WELL	SWITCH
_4C	FO	PF	00:06:36	00:07:12	00:07:26	00:00:50	1 PREPARATION	OHP	LOGO	SWITCH
_5A	FO	PF	00:07:26		00:08:02	00:00:36	1 PREPARATION	OHP		
	FO	PF				00:07:41	1 PREPARATION	OHP		

Figure 38. Détail de l'étude d'analyse gestuelle sur l'ensemble d'un vol commercial.

Lorsque cette analyse a été réalisée, le choix des critères ne découlait pas de l'étude réflexive que nous avons menée dans ce chapitre. L'enjeu était de couvrir un panel de description suffisamment large pour discriminer les gestes entre eux et trouver des variables significatives

pour discuter des gestes avec les pilotes et les membres du projet Airtius lors des phases de design futur. J'ai d'abord retranscrit une partie des gestes opérationnels réalisés par l'équipage d'un vol en condition simulateur. Cependant, après la retranscription de 80 gestes, j'ai décidé d'arrêter la retranscription puisqu'en grande partie les gestes étaient hésitants et répétés. Cela s'explique par l'apprentissage de l'activité. Afin d'être plus en accord avec les besoins opérationnels, nous avons choisi d'analyser un vol commercial avec un équipage de pilotes professionnels (vol retour du 2 juillet 2017 sur B737-800). L'étude de ce vol a donné lieu à une deuxième retranscription spécifique aux gestes opérationnels exécutés sur le panneau de contrôle des systèmes avioniques présent en tête haute (OHP ou *Overhead panel*). Nous avons limité notre analyse aux gestes agissant sur cette zone car l'une des intentions des surfaces tactiles est de remplacer l'accès aux fonctions disposées sur l'OHP (e.g. projet *Avionics 2020* par Thalès). L'étude est décrite dans un fichier Excel et elle décrit 90 gestes avec la présence pour chaque geste d'un résumé descriptif (cf. Figure 38).

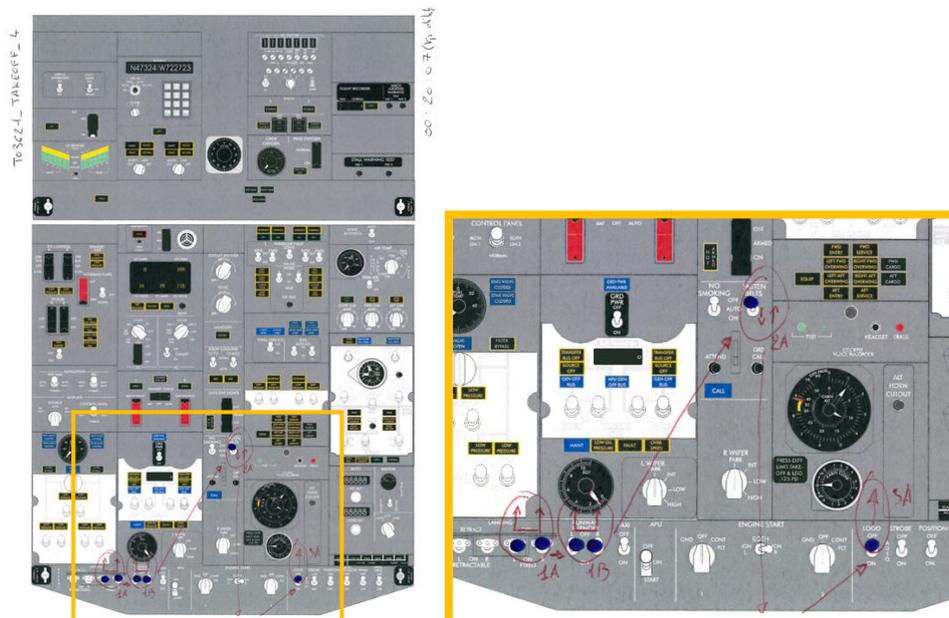


Figure 39. A gauche, exemple de représentation spatiale des déplacements de la main du pilote sur le panneau de contrôle supérieur (Overhead panel), à droite, détail de l'image de gauche.

En complément du fichier Excel, une représentation schématique des déplacements des mains dans l'espace a été réalisée pour chaque flot procédural (cf. Figure 39).

2.3.2 Observations

Nous présentons une analyse du comportement gestuel basée sur des séances d'observations avec des pilotes professionnels lors d'exercices réels ou en simulateurs. L'enjeu est de comprendre les besoins opérationnels des pilotes par rapport à leurs comportements gestuels.

A Rôles et domaines de responsabilité

Pour rappel (cf. 1.1.1.A), un avion de ligne est généralement exploité par un équipage de deux pilotes : l'un, le pilote commandant de bord (PIC), est le commandant de bord, tandis que l'autre est le copilote de soutien (FO). En outre, à tout moment du vol, les pilotes peuvent remplir deux rôles différents et accomplir deux tâches associées. Le Pilot Flying (PF) est responsable du pilotage de l'appareil et du contrôle de la trajectoire de vol. Le Pilot Monitoring (PM) est responsable de la surveillance de la trajectoire de vol, de l'énergie et de l'état du système de l'avion, ainsi que de la gestion des communications avec les contrôleurs de la circulation aérienne. L'équipage de deux pilotes de ligne a besoin d'une répartition précise des tâches pour assurer une gestion optimale des ressources de l'équipage (CRM). A cet effet, des procédures opératoires normalisées sont définies, fondées à la fois sur une stricte séparation des tâches et sur une étroite collaboration entre les deux rôles de PF et PM. Un aspect clé de l'activité dans le poste de pilotage d'un avion de ligne est que, bien que l'équipage rassemble pour chaque vol régulier une paire de pilotes qui ne volent habituellement pas ensemble, chaque pilote est un expert hautement qualifié dans les deux rôles de PF et PM. Par conséquent, ils sont en mesure de bien comprendre les actions et les gestes associés effectués par l'autre pilote.

En ce qui concerne l'utilisation de l'espace du poste de pilotage, la stricte séparation des tâches conduit à une répartition des zones d'entrée dans le système, en fonction du rôle du pilote et des différents systèmes avioniques conçus par les constructeurs en formant des aires de responsabilité (cf. 1.1.1.B). Par exemple, sur un Boeing 737-800, en vol, le PF agit manuellement et presque exclusivement sur l'accélérateur, sur le manche (ici un yoke) et sur les pédales de direction. La durée du contact avec ces deux commandes peut être longue puisqu'elle dure pendant toute la phase de décollage et d'atterrissage (y compris les deux phases de la voie de circulation). Le PF agit également sur les commandes physiques du FCU (Flight Control Unit) pour ajuster les paramètres de vol (vitesse, altitude, cap, etc.) ou pour activer le pilote automatique. Les temps de contact ici sont de l'ordre de la seconde (cf. Figure 38). Sur un Airbus A320, la principale différence réside dans l'utilisation du FCU, qui n'est pas attribué au PF mais au PM. L'espace d'action gestuelle du PM est beaucoup plus large. Responsable notamment de la gestion des systèmes de bord et de la planification des trajectoires, il interagit avec un grand nombre de commandes physiques, situées entre les pilotes sur le panneau supérieur du plafond du cockpit (gestion des systèmes de bord) ou sur le piédestal (par exemple, système de gestion de vol).

La disposition des commandes physiques sur les tableaux de bord exige que les pilotes fassent des gestes amples. En effet, l'architecture des cockpits et les séquences de tâches nécessitent souvent de grandes trajectoires gestuelles qui peuvent facilement être perçues visuellement par l'autre pilote. Lorsque l'action est moins perceptible et que l'action est cruciale, le geste peut être accompagné de la parole, comme c'est le cas pour la commande de l'allumeur du moteur des avions Airbus. Lorsque le pilote agit sur le levier, il tient la commande physique en la saisissant par le bas et place sa main de manière à ce que l'identification du moteur sélectionné reste visible, tout en indiquant l'action à venir.

Régulièrement, et en particulier à chaque nouvelle phase du vol, les deux pilotes agissent conjointement. Ils ont chacun des tâches différentes et des gestes associés à accomplir dans leur domaine de responsabilité, mais ces gestes pilotes sont régis par une séquence précise dictée par des procédures ou des listes de contrôle. Toutes les opérations doivent toujours être bien comprises et partagées par les deux pilotes. S'ils ne surveillent pas directement le travail de l'autre, ils doivent constamment évaluer les actions de l'autre pour séquencer leurs propres tâches, anticiper ou vérifier l'évolution des procédures et des vols et anticiper les risques techniques ou les déficiences humaines possibles. La communication au sein d'un équipage est un enjeu essentiel dans la performance d'un vol comme l'explique un pilote : « tout le travail, j'ai envie de dire du travail en équipage, c'est d'apprendre à communiquer, mais c'est vrai que ce n'est pas toujours facile. [...] le travail en équipage, si tu veux c'est léger comme une plume quand tout va bien mais c'est lourd comme le plomb quand tout va mal. C'est-à-dire que quand tu es sur un flot, tu l'as travaillé des dizaines de fois au simu (simulateur d'avion), avec ton collègue tu le trouves c'est une musique quoi... [...] Par contre, je te dis c'est lourd comme le plomb quand tu tombes sur des situations un peu moins travaillées quoi, c'est-à-dire que là tu te refermes, tu te recentres sur toi-même ». C'est pourquoi, la perception des séquences gestuelles qu'ils exécutent est un aspect essentiel de la conscience mutuelle entre les pilotes.

REFERENCE	T03621_ TAKEOFF_3	T03621_ TAKEOFF_3_1A	T03621_ TAKEOFF_3_1B	T03621_ TAKEOFF_3_2A	T03621_ TAKEOFF_3_2B	T03621_ TAKEOFF_3_2C
GRADE	Pilot-In-Command (PIC)	PIC	PIC	PIC	PIC	PIC
ROLE	Pilot Monitoring (PM)	PM	PM	PM	PM	PM
TIME START		00:00:42	00:01:56	00:03:16	00:04:45	00:05:20
TIME CONTACT		00:01:44	00:02:21	00:04:07	00:05:08	00:05:40
TIME FINISH		00:01:56	00:03:16	00:04:45	00:05:20	00:06:46
SUM	00:06:04	00:01:14	00:01:20	00:01:29	00:00:35	00:01:26
FLIGHT'S STAGE	3 TAKEOFF	3 TAKEOFF	3 TAKEOFF	3 TAKEOFF	3 TAKEOFF	3 TAKEOFF
CHECKLIST						
SPACE	Overhead Panel (OHP)	OHP	OHP	OHP	OHP	OHP
SYSTEM		ENGINE START 1	ENGINE START 2	ENG ANTI ICE 1	ENG ANTI ICE 2	ENG ANTI ICE 1 & 2
INTERACTOR		ROTARY SELECTOR	ROTARY SELECTOR	SWITCH	SWITCH	SWITCH
CONTACT		OUI (X)	X	X	X	X
OBSERVATION	le PF demande oralement "aller on va peut-être engine anti ice" et le PM rétorque "aller" pendant l'exécution de son premier geste de la série	pincement index et pouce puis tourne le bouton (le PM rétorque "aller" pendant l'exécution du geste)	pincement index et pouce puis tourne le bouton	pincement index et pouce sur l'interacteur et agit en poussant vers le bas	pincement index et pouce sur l'interacteur et agit en poussant vers le bas	geste déictique; le pilote pose le bout de son index et de son majeur comme pour confirmer la position des interrupteurs
HAND		Droite (D)	D	D	D	D
GS 1 C PS						
GS 1 C PC		OUI (X)	X	X	X	X
GS 2 C						
GC						
FEPI						X
FSEM						
FERG		OUI (X)	X	X	X	
GAZE		Regard sur le geste (RG)	RG	RG	RG	RG
SPEAK		Annonce oral (AO)	Sans parole (SO)	SO	SO	SO
NOTES	time start 00:19:42 sur T03621	geste exécuté juste après avoir fait un geste déictique (index tendu) en direction de l'ECAM pour regarder les moteurs	posture héritée du geste 1A		posture héritée du geste 2A	index et majeur tendus

Figure 40. Analyse du flot procédural associé à l'activation des brûleurs anti-givres réalisé par un pilote sur un Boeing 737-800.

B Médium d'informations

En plus d'accomplir des mouvements pour obtenir une action, le geste est un important moyen d'information. Lorsque le conduit auditif est surchargé, le pilote utilise de façon informelle la fonction sémiotique des gestes pour communiquer dans le poste de pilotage. Par exemple, il y a beaucoup de signes gestuels « oui » et « non » ou la mimique d'une action qui permettent aux pilotes de coordonner ou de vérifier la préparation ou l'exécution d'une action en silence comme l'explique ce pilote : « Par exemple tu vois, tu as la radio, t'es en train d'arriver, tu as de la vitesse etc., tu vois qu'il va falloir réduire etc., et l'autre, le contrôleur te parle, et puis, le PM qui fait la radio il est en train de parler et puis toi tu te dis il faut que je sorte les *flaps* là parce que si je ne les sors pas tout de suite je serai obligé de remettre les gaz. Et bien souvent tu le regardes, tu fais (en mimant le geste de préparation), le mec il comprend, il sort les *flaps*, tu n'as pas besoin de lui dire. Ou, tu as le contrôleur qui pose une question à l'équipage « est-ce que vous êtes capable 2390 » pendant que le contrôleur il pose la question, le PF il va sur le FMC, il regard le niveau max et puis il fait (fait un geste signifiant oui de la main). T'économise deux messages radios et aujourd'hui où les fréquences radio sont saturées c'est impressionnant le nombre de fois où on fait « oui, non » (geste de la main) » (cf. Figure 41).



Figure 41. Observation d'un geste accentué.

Les gestes informent également l'équipage du comportement ou de l'état du pilote, d'abord par l'action entreprise, mais aussi par la singularité des mouvements du pilote. Par exemple, ils peuvent indiquer un état de fatigue, un état de stress ou de nervosité, ou un état de frustration. Un pilote explique comment « en situation d'approche turbulente par exemple, ou par mauvaise condition météo ... la bonne façon de voir si son pilote est à l'aise c'est de voir quelle est l'activité du manche. Comme on (les pilotes) n'a pas d'instrument d'activité manche de l'autre, on est obligé de regarder et si on voit qu'il est en permanence en train de faire

comme ça (agite le manche), on sait très bien qu'il est sous stress, et qu'il est fébrile vis-à-vis de l'approche [...] on peut lui dire tout simplement « lâche le manche, tu vas voir que ça va arrêter de turbuler » et là miracle ! ça arrête de bouger. Et oui, parce qu'on crée de l'auto-turbulence avec un Airbus hein... ». Ces informations sont cruciales pour la connaissance mutuelle et donc pour la sécurité. Si le pilote voit de la fatigue ou de l'anxiété chez son copilote, alors qu'il devrait être responsable de l'atterrissage, il peut proposer d'inverser les rôles et d'effectuer l'action.

C Geste atomique et flot procédural

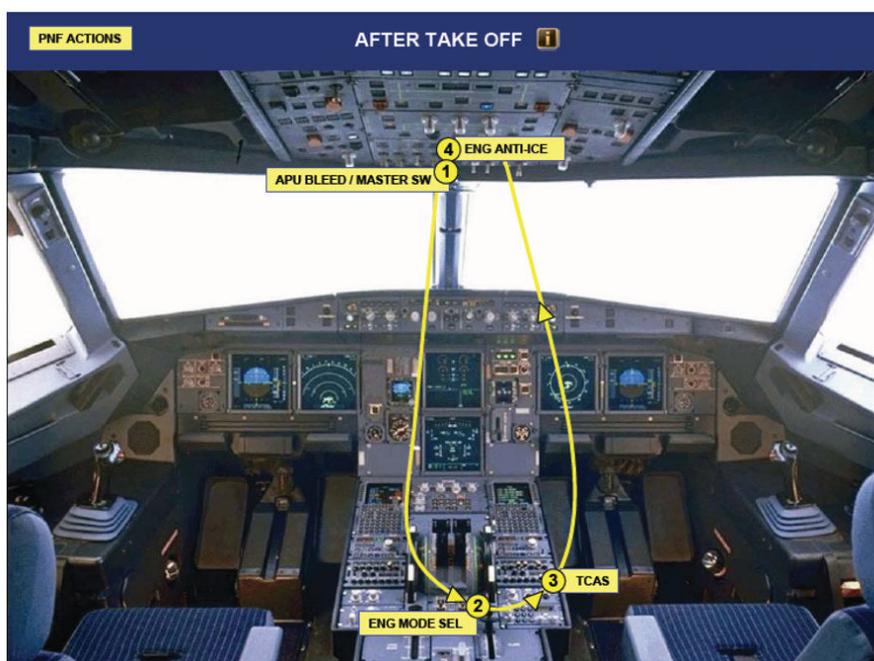


Figure 42. Exemple de flot procédural, ici « After Takeoff » sur série A318, A319, A320, A321.

Un geste considéré comme un élément isolé est traditionnellement désigné comme un geste atomique. Par rapport au contexte aéronautique, il peut être décrit comme un mouvement corporel produisant une seule interaction sur le système avionique. Néanmoins, il est intéressant de noter d'après nos observations que ce geste atomique fait toujours partie d'un flux procédural. Il n'y a pas d'interaction isolée. Les pilotes exécutent des séquences gestuelles conformément aux protocoles ou procédures définies par les compagnies aériennes et les constructeurs (cf. Figure 42). Ils sont connus de tous les pilotes de ligne. Ainsi, les procédures régulières sont répétées à chaque vol et sont habilement maîtrisées. Par contre, les procédures d'urgence ou de panne critique exigent que les pilotes soient plus attentifs et qu'ils soient moins fluides dans leurs mouvements⁸.

⁸ J'ai constaté ce phénomène lors d'un risque aviaire (*Birdstrike*) au cours du vol aller en condition réelle. Notre appareil (Boeing 737-800) est entré en collision avec des oiseaux à la

D Rythmes et temporalités

Les dimensions temporelles d'un geste sont importantes pour assurer une conscience mutuelle dans les cockpits. Elles concernent d'abord la décomposition d'un seul geste en étapes successives : mouvement du corps vers le contrôle cible, préparation ou anticipation gestuelle, activation du contrôle, et éventuellement vérification manuelle finale de l'action. Elles sont également liées au parcours et au rythme global du flux gestuel. La perception de ces successions, rythmes ou sommations de durées gestuelles, informe l'équipage de conduite de sa propre performance. Un pilote parle de « musique » et explique : « ce que je regarde un peu c'est le flot, de ses actions, j'aime pas le gars qui pou pou pou pou pou (agite rapidement ses bras), j'aime bien que ce soit fait avec un peu un rythme réfléchi ». Surtout, le pilote pourra modifier volontairement la fluidité du geste. Grâce à sa dextérité, un pilote peut agir sur le rythme global du flux, ou caricaturer certaines parties du geste, par exemple en marquant des temps d'arrêt intentionnels lors de la préparation du geste pour fournir des informations à l'autre pilote.

E Spatialisation des contrôleurs

La disposition des commandes physiques et de l'information dans le poste de pilotage permet aux deux pilotes d'avoir un accès visuel et gestuel commun. De plus, comme les pilotes sont assis, ils doivent suivre des trajectoires gestuelles de longueur variable pour atteindre les panneaux de commande. Ces trajectoires sont automatiquement perceptibles par l'ensemble de l'équipage. Comme les pilotes ont une connaissance corporelle de l'emplacement de chaque élément du poste de pilotage, ils sont capables de percevoir à tout moment quel objet est actionné par les gestes de l'autre pilote. D'après ce pilote « quand tu regardes les boutons de profils, tu vois s'ils sont bien configurés ou pas. Donc c'est fou hein, en fait tu cherches une image quoi en fait, et quand tu vois que l'image est là bah c'est bon. Tu ne sais même pas comment s'appelle les boutons quoi en fait, enfin si tu les connais mais pour toi c'est un tout quoi ». Il ajoute : « c'est étonnant comme on est effectivement robotisé dans l'action et aussi dans le check quoi, tu vois tout de suite qu'un truc est bien positionné ou pas ». Un autre pilote aborde le niveau de lecture pour arriver à cette automatisation du regard. « En fait quand on dit « on regarde » ... on n'a pas besoin d'y passer des heures pour prendre des informations : on sait ce qu'on cherche, on va aller capturer l'information dont on a besoin [...] c'est ce qu'on apprend en pilotage initial : tu vas chercher ton information, tu la fous dans ta tête, tu reviens sur tes instruments, et tu réfléchis à ce que tu dois faire. Du coup on n'a pas besoin d'être tout le temps comme ça (se penche vers l'avant) à regarder tout en pilotant ». Avec les surfaces tactiles, l'absence de

fin de la piste (après « V1 » sur une piste de l'aéroport de Paris-Orly) obligeant les pilotes à poursuivre la procédure de décollage. En effet, lorsque l'avion dépasse le repère V1 sur la piste, la distance de freinage est insuffisante et oblige le PF à décoller.

matérialité des commandes physiques rend plus complexe l'acquisition des informations. Un pilote énonce l'impression qu'il ressent en comparant un bouton tridimensionnel à la représentation d'un bouton sur une surface bidimensionnelle : « là (en montrant le bouton sur l'écran) visuellement il n'y a pas de relief. Là j'étais incapable de vous dire si c'était en on ou en off ».

F Intentionnalité

Un premier aspect fondamental du geste accompli par le pilote est son intentionnalité. Le pilote agit sur le système avionique avec parcimonie et vise à effectuer une action dès qu'il place sa main sur un contrôle physique comme le mentionne ce pilote : « en fait, on ne fait jamais d'actions qui soit involontaires, donc c'est un objectif qu'on se donne ». Le contexte critique exige que les pilotes mesurent leurs actions. Ils ne peuvent pas modifier une valeur ou une fonction sans évaluer au préalable l'impact de leurs actions sur la sécurité. L'intentionnalité est donc une notion essentielle du geste, pour l'accomplissement du travail collaboratif de l'équipage et donc pour la conscience mutuelle. L'intention doit être partagée et donc visible. Le geste, par la force de sa matérialité et la visibilité de son mouvement, est un moyen naturel pour informer l'équipage.

G Technicisation et automatisation des gestes

Les procédures et les tâches hautement prescrites de l'équipage de conduite donnent lieu à des flux de procédures qui sont un ensemble d'actions à exécuter dans un ordre précis. Ces actions sont de trois types : les actions gestuelles avec interaction sur les commandes physiques, la surveillance visuelle de l'information, enfin les communications orales entre pilotes ou entre les pilotes et des opérateurs restés au sol tels que les contrôleurs aériens. Les pilotes doivent exécuter ces procédures en fonction des phases de vol ou des situations rencontrées. Un entraînement spécifique et une répétition constante des gestes leur permettent d'atteindre un haut niveau de contrôle et de technicisation, comme le mentionne ce pilote en mimant les gestes pour chaque action : « quand tu sors le train, (landing) gear down (train d'atterrissage), speed check (contrôle de la vitesse), l'auto-break (inclinaison des ailes), tu sors les spoilers (freins sur ailes), clac, clac, t'allumes les phares, c'est des choses qui sont ancrées gestuellement et qui font que tu n'oublieras rien. Après, quand arrive le moment de la checklist, de toute façon on va monitorer certaines actions que tu as faites et qui étaient mandatées (obligatoires) ». L'objectif est de faire en sorte que le corps et les aptitudes physiques minimisent les ressources cognitives nécessaires à la réalisation de ces actions. L'objectif est de libérer ces ressources afin de les affecter à d'autres tâches.

2.3.3 Conclusion

Nous avons proposé une analyse de l'activité de pilotage focalisée sur les comportements gestuels des pilotes dans l'exercice de leurs fonctions. En cohérence avec le sous-chapitre précédent (cf. chapitre 2), nous avons déterminé des points d'intérêts basés

sur les besoins opérationnels vis-à-vis de la perception des gestes de l'autre. L'analyse montre que l'exécution d'un geste technique dans l'habitacle participe pleinement grâce à son expressivité à la conscience mutuelle. A partir de ces points d'intérêts, nous proposerons dans la section suivante, la détermination des dimensions gestuelles à représenter graphiquement à l'attention des pilotes pour améliorer la conscience mutuelle dans le cas d'interactions tactiles.

2.4 DISCUSSION DES DIMENSIONS

Au terme de ce chapitre, nous proposons neuf dimensions des gestes à représenter sur notre artefact de suppléance pour assurer une conscience mutuelle performante dès lors qu'il y a une interaction sur surface tactile. Il y a l'identification, la localisation, la temporalité, le mouvement, le statut, l'intention, la trace, le rôle et la complétude (cf.

Figure 43). Les dimensions sur les modalités d'entrée et de sortie ont été enlevées. Elles ne relèvent pas d'un intérêt particulier pour la conscience mutuelle puisqu'en effet, elles concernent d'abord celui qui exécute son propre geste (e.g. retour tactilo-kinesthésique) plutôt que le partage d'information.

Traits du Mouvement	Traits de l'Action	Traits du Geste	Dimensions des gestes numériques	Dimensions pour la conscience mutuelle
Corps / Partie du corps animé			Identification	Identification
				Rôle
Changement de position		Changement de position	Mouvement	Mouvement
Espace de référence spatial			Coordonnées	Localisation
Espace de référence temporel / Durée			Temporalité	Temporalité
Objet inanimé				
	Production d'un effet		Statut	Statut
	Observable / Mesurable			Trace
	Résultat			Complétude
	Intentionnalité		Fonction	Intention
		Porteur de signification		
		Attitude		
			Modalité d'entrée	
			Modalité de sortie	

Figure 43. Synthèse des traits et des dimensions retenus comme caractéristiques des gestes à afficher pour nos propositions futures de design graphique.

La première dimension que nous présentons est celle de **l'Identification** (G4). Au regard de l'activité de pilotage, nous avons décidé d'introduire à la dimension d'identification une autre information que celle présentée jusqu'à présent sur l'identité du geste ou de son géniteur (désormais attribuée à la dimension sur le **rôle** (G9) et spécifiant le statut du pilote comme PF ou PM à l'origine du geste). L'identification comporte ici deux informations relatives à la fonction engagée par le geste : d'une part l'identification de la fonction avionique et d'autre part son état à un instant t. Attention ! Le terme « état » diffère de l'état du geste (dimension du statut), ici l'état correspond à une information sur la fonction avionique (e.g. état démarrage des moteurs, phares allumées). En somme, l'identification du geste passe d'abord par l'information avionique engagé par le geste (cf. 2.3.2.F). Ensuite, nous proposons la dimension sur la **Localisation** (G1) Elle détermine les coordonnées d'un geste sur une surface tactile d'après son positionnement dans l'espace selon les axes cartésiens x et y (et z si prise en compte de la pression ou avec le couplage d'un dispositif de capture visuel). La prochaine dimension est celle de la **Temporalité** (G2). Elle regroupe les notions de marqueurs temporels à la fois sur le plan atomique, le geste isolé, mais également par rapport à un ensemble de gestes, la séquence gestuelle (cf. 2.3.2.C & 3.3.2.D). En cohérence avec ces deux dimensions, il y a la dimension du **Mouvement** (G3) qui correspond au déplacement des coordonnées du geste dans le temps. La dimension du **Statut** (G5) représente l'état d'accomplissement du geste par rapport à une action sur une fonction avionique. En d'autres termes, il s'agit d'avoir un retour d'information sur la performance du geste par rapport au système. Nous pouvons traduire cette définition par deux questions. Est-ce que le geste a bien été identifié par le système ? Est-ce qu'il a correctement engagé la fonction désirée ? En complément nous présentons la dimension de **Complétude** (G8). Jusqu'à présent absente, c'est avec l'analyse globale du comportement gestuel des pilotes que nous la proposons pour nuancer avec la dimension du Statut. En effet, la dimension de la complétude concerne le « contrôle » de l'aboutissement d'une action lorsqu'elle est isolée, et plus largement d'une séquence gestuelle par rapport à un flot procédural ou une checklist. La prochaine dimension proposée concerne **l'Intention** (G4). Nous avons remplacé le terme « fonction » par « intention » afin d'être plus en phase avec la culture langagière des pilotes (cf. 2.3.2.F). La dimension de l'intention désigne l'intentionnalité du geste, notamment lorsqu'il doit être partagé par l'équipage comme cela peut être le cas avec des gestes à « cross check ». Enfin, la dernière dimension que nous proposons concerne la **Trace** (G7). Elle représente l'ensemble de la séquence gestuelle. Les pilotes ont besoin d'avoir une trace des agissements gestuels. Actuellement, cette fonction est assurée par la matérialité des contrôleurs physiques grâce à l'externalisation des informations (cf. 2.2.2.E). Cela leur permet d'avoir un historique accessible librement dans le temps pour pouvoir contrôler la complétude des gestes.

2.5 CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de proposer un cadre comportant des dimensions pour la conscience mutuelle à partir des gestes. Les objectifs sont, d'une part de permettre l'identification des données à afficher pour les gestes numériques de nos designs graphiques (cf. chapitres 5 et 6) et d'autre part, d'apporter des premiers éléments pour répondre à l'une de nos questions de recherche qui est : Quelles sont les dimensions constitutives des gestes (ou les informations critiques) qui participent à la conscience mutuelle des pilotes ?

Nous avons d'abord étudié le domaine de la conception des interactions gestuelles puisqu'il s'agit de concevoir des représentations en accord avec les possibilités technologiques des dispositifs numériques. Cela nous a permis de produire une première version de notre cadre de définition à partir des gestes numériques en spécifiant huit dimensions (modalités d'entrée, modalité de sortie, identification, coordonnées, temporalité, mouvement, statut et fonction). Cependant, nous avons constaté plusieurs faits. D'abord, le domaine de la conception utilise le geste numérique comme un objet technique au même titre que n'importe quel artefact qui soit façonnable. Il doit être capturable dans l'espace (être contenu dans une zone d'interaction). On le décompose temporellement, on lui attribue des postures pour pouvoir le reconnaître et lui assigner une intentionnalité signifiante. Cependant, avec la notion d'utilisabilité ou la notion de fonction par exemple, on constate un malaise face à cette conception puisque le geste appartient avant tout au comportement de l'utilisateur. La compréhension de ce comportement dépasse le cadre de l'informatique. Elle implique une ouverture vers d'autres littératures (e.g. Sciences Humaines et Sociales). Ensuite, il n'existe pas de définition universelle que l'on puisse approprier au geste numérique. Cela dépend de la « réalité » technologique du dispositif.

L'étude du comportement gestuel selon les Sciences Humaines et Sociales nous a permis d'aborder plus largement le comportement gestuel. D'abord, nous avons étudié les traits utilisés pour décrire les définitions du mot geste dans la littérature spécialisée. En cohérence avec la définition des gestes associées aux « réalité » technologique des dispositifs, notre étude montre que cette « réalité » s'étend également à la diversité culturelle des individus. Par ailleurs, nous avons abordé l'importance du geste dans le développement de la technique des pilotes. A travers cette autre étude, nous avons décelé à quel point il est l'important de représenter la « sensibilité » des gestes (e.g. dextérité, rythme, apprentissage du mouvement). La sensibilité participe pleinement à l'acquisition de l'expertise nécessaire à l'accomplissement d'un travail collaboratif performant.

Enfin, nous avons effectué une étude spécifique des gestes physiques des pilotes vis-à-vis du travail collaboratif. Cela nous a permis d'enrichir les dimensions des gestes numériques avec les dimensions des gestes physiques afin de proposer une deuxième version de notre cadre de dimensions des gestes à afficher (l'identification, les coordonnées, la temporalité, le mouvement, le statut, l'intention, la trace, le rôle et la complétude) pour nos travaux de représentations des interactions gestuelles (cf. chapitres 5 et 6).

3 CHOIX DE REPRESENTATION

« Quand je vois à travers l'épaisseur de l'eau le carrelage au fond de la piscine, je ne le vois pas malgré l'eau, les reflets, je le vois justement à travers eux, par eux. S'il n'y avait pas ces distorsions, ces zébrures de soleil, si je voyais sans cette chair la géométrie du carrelage, c'est alors que je cesserais de le voir comme il est, où il est, à savoir : plus loin que tout lieu identique. »

En parlant de l'œuvre de David Hockney (cf. Figure 44). (M. Merleau-Ponty 1964, pp70-71)

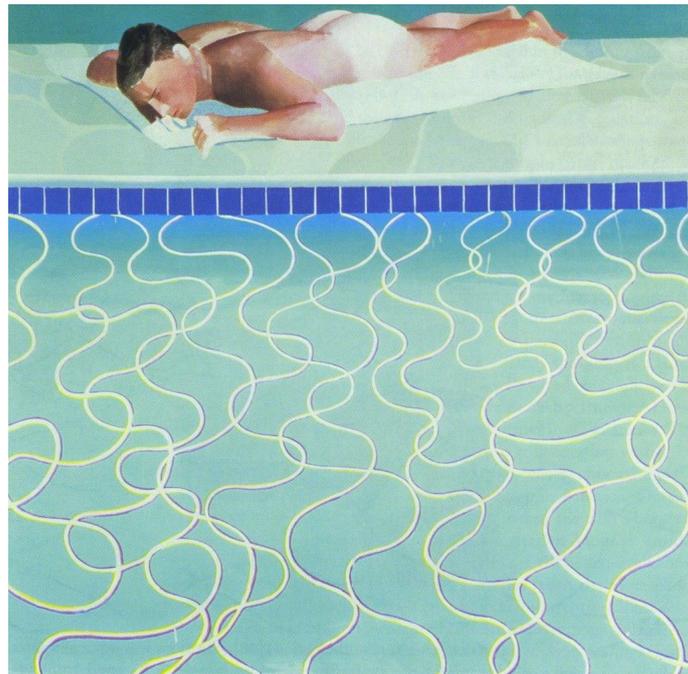


Figure 44. Sunbather par David Hockney, 1966.

Après avoir déterminé dans le chapitre précédent (cf. chapitre 2) les dimensions des gestes à représenter pour améliorer le travail collaboratif lors d'interactions tactiles, nous présentons dans ce chapitre un cadre théorique pour répondre à l'une de nos questions de recherche. Ce cadre permettra de construire nos propositions de designs afin d'en évaluer la qualité (cf. chapitre 5 et 6).

Comment une représentation peut-elle restituer pré-attentivement la conscience mutuelle transmise par les dimensions des gestes numériques ?

Le poste de pilotage est un environnement collaboratif particulier. Bien que les pilotes soient co-localisés dans le même espace physique, leur besoin en matière de conscience mutuelle correspond à une collaboration à distance, dite distribuée, puisqu'ils interagissent sur deux écrans différents et doivent maintenir leur regard dans des directions différentes. Le pilot flying doit regarder en face de lui, vers l'extérieur pour assurer la tâche de pilotage tandis que le pilot monitoring doit regarder les informations avioniques présentes à l'intérieur de l'habitacle. Cette forme de collaboration est proche de la collaboration mixte (Doucette, Gutwin, and Mandryk 2015) qui se produit lorsque les gens divisent le travail, exécutent les tâches assignées individuellement, puis se réunissent pour fusionner leurs résultats.

Nous proposons un état de l'art spécifique à la représentation des gestes, valable dans le cadre du travail collaboratif à distance autant que co-localisé. La présence d'une représentation des gestes sur les interfaces apporte un gain de rapidité d'exécution des tâches entre les utilisateurs en améliorant leur conscience mutuelle par rapport à l'utilisation de la parole seule (Wang et al. 2017). Elle permet de localiser spatialement les gestes des utilisateurs par rapport aux interfaces (Koh et al. 2011) et d'améliorer la coordination des actions (Doucette, Gutwin, and Mandryk 2015). Elle permet également de déceler une erreur pendant l'exécution d'un geste (Gutwin and Greenberg 2005) et de compléter un discours : « Clark (McCarthy and Hatcher 1996, 326) summarizes the difference between verbal and visual acknowledgment for on-going "installment" utterances like instructions: "in installment utterances, speakers seek acknowledgments of understanding (e.g. 'yeah') after each installment and formulate the next installment contingent on that acknowledgment. With visual evidence, (the speaker) gets confirmation or disconfirmation while he is producing the current installment." » (Gutwin and Greenberg 2005, 30). Néanmoins, les analyses menées avec les pilotes nous ont progressivement convaincus que les représentations actuelles n'étaient pas adaptées à leurs besoins opérationnels. En effet, une grande partie de ces représentations ont en commun d'associer la morphologie de l'utilisateur à la représentation du geste numérique. Or nous faisons l'hypothèse que le bénéfice de la morphologie, vis-à-vis de la spatialisation, n'est pas en phase avec les contraintes des interfaces tactiles dédiées à l'activité de pilotage. Comme nous l'avons précédemment présenté et bien que nous soyons conscients de l'importance bénéfique de

la spatialisation des fonctions avioniques avec des contrôleurs physiques pour la conscience de la situation (cf. 1.2.4), l'intégration des surfaces tactiles dynamiques avec notamment le développement des systèmes SVS/EVS/CVS (cf. 1.4.2) bouleverse cette spatialisation donc elle rend complexe la mise en œuvre d'un affichage unique sur les écrans des pilotes puisqu'ils ont des besoins d'informations en cohérence avec la réalisations de tâches multiples. Par ailleurs, nous pensons que l'affichage d'une forme morphologique pour illustrer les gestes ne correspond pas au besoin d'attention sélective requis par les pilotes. Pour rappel, il s'agit de la capacité à filtrer les informations brutes permettant d'optimiser la réalisation des tâches en économisant le plus de ressources de travail possible (cf. 1.2.1). Par exemple, l'étude (Ligda et al. 2015) du cas du cockpit déporté (concept *Single Pilot Operations*), montre que la retransmission vidéo focalisée sur le comportement gestuel du pilote dans l'avion requiert une trop grande attention cognitive pour assurer un travail collaboratif à distance de la part du pilote au sol. Nous pensons que la représentation de la main n'est pas adaptée pour permettre le développement d'un outil pré-attentif. Pour rappel, la pré-attention permet au pilote d'accéder à l'information sur un afficheur graphique de manière quasi-instantanée (cf. 1.2.4). Enfin, puisque les pilotes sont dans un environnement mixte (entre co-localisé et distribué), nous pensons qu'ils n'ont pas besoin d'avoir une représentation morphologique des gestes puisqu'ils perçoivent toujours en vision périphérique les mouvements des corps des pilotes. L'intention de notre dispositif graphique n'est pas de produire une substitution, ce qui serait le cas dans une situation à distance, mais bien une suppléance, c'est-à-dire un enrichissement d'informations qui reste toujours pertinent tout en étant désormais moins perceptible (voire imperceptible avec l'occultation des informations avioniques par la main en action sur l'interface lors de turbulence, cf. 1.4.2) par des interactions tactiles. L'objectif principal de notre outil de suppléance est donc d'afficher une représentation gestuelle combinée aux informations avioniques.

C'est pourquoi, l'enjeu de ce chapitre est de voir s'il est possible de concevoir une représentation des gestes qui soit différente de celle basée sur la morphologie humaine et qui puisse être adaptée aux besoins opérationnels de l'activité de pilotage :

Peut-on faire converger des informations de dimensions utiles à la conscience mutuelle, provenant des gestes numériques, avec des informations informatiques ?

Déroulé du chapitre

En premier lieu, nous situerons notre travail vis-à-vis des concepts de suppléance et de substitution, afin de fixer le dessein conceptuel de notre travail (cf. 3.1). Nous présenterons ensuite un état de l'art sur les formes des représentations des gestes actuellement utilisés dans la littérature propre aux domaines du travail collaboratif à distance (cf. 3.2.1) et du travail co-localisé (cf. 3.2.2). Ces études proposent des représentations basées sur la morphologie humaine. Nous proposons de mettre en écho la construction de ce type de représentation avec le paradigme de l'art figuratif. Cela nous

permet de proposer une « autre manière » de représenter le geste. Pour conforter notre hypothèse, nous utiliserons d'abord des concepts théoriques issus du représentationnalisme (cf. 3.3.1) avec les Qualia et les notions « d'effets », puis les principes de convergence avec les statuts de majorité et de minorité proposés par Gilbert Simondon (cf. 3.3.2). Ceux-ci nous permettront d'envisager la fusion dans notre outil graphique des informations provenant de la singularité des comportements gestuels avec les informations avioniques du système de l'avion. Enfin, le dernier sous-chapitre est dédié à la présentation de quatre outils sur lesquels nous nous sommes appuyés pour la conception de nos propositions de design (cf. chapitres 5 et 6) : un guide de représentation pour les gestes dans le cadre de l'apprentissage (cf. 3.4.1), la Sémiologie Graphique (cf. 3.4.2), la Gestalt (cf. 3.4.3) et enfin des règles à suivre pour produire un système pré-attentif (cf. 3.4.4).

3.1 DEFINIR LE STATUT DU DISPOSITIF DE REPRESENTATION

Nous commençons ce chapitre en définissant le statut de notre système de représentation par rapport aux notions de suppléance et de substitution. Ces deux statuts n'impliquent pas les mêmes considérations de perception de la part des pilotes et déterminent une clé de conception.

3.1.1 Définitions de la suppléance et de la substitution

La substitution relève de ce qui remplace une fonction déficiente pour réaliser la même opération et atteindre la même finalité. Dans le domaine de l'Interaction Humain-Machine, la substitution concerne la représentation des gestes dans le cadre des interactions collaboratives dites distribuées (à distance).

A l'inverse, la suppléance est un phénomène visant à produire un enrichissement d'une expérience par addition ou augmentation d'une propriété sensorielle déjà existante mais déficiente dans le but de proposer une expérience nouvelle et unique (Lenay 2006). C'est par exemple le cas lorsque l'aveugle utilise sa canne blanche (bâton) pour interagir avec le monde qui l'entoure. « Le bâton de l'aveugle a cessé d'être un objet pour lui, il n'est plus perçu pour lui-même, son extrémité s'est transformée en zone sensible, il augmente l'ampleur et le rayon d'action du toucher, il est devenu l'analogue d'un regard » (Maurice Merleau-Ponty 1945, p167). Celui-ci utilise la capacité tactilo-kinesthésique de sa main et plus largement de la partie haute de son corps pour construire cognitivement, par le biais de sa canne, une représentation éactive des contraintes de son environnement. Il peut ainsi déterminer la distance avec les obstacles et les éviter ou au contraire décider de les suivre. La fonction de toucher remplace celle de la vue pour atteindre le même objectif : percevoir le monde. On parle de suppléance et non de substitution car l'expérience est différente. Vis-à-vis de la représentation des gestes, la suppléance correspond aux interactions collaboratives dites co-localisées. Nous détaillerons des exemples sur les travaux collaboratifs en milieux distribués et co-localisés dans le prochain sous-chapitre (cf. 3.2).

3.1.2 Choix du mode de représentation iconique face au modes enactif et symbolique

D'après Jérôme Bruner (Lecture de Jérôme Bruner par Barth 1985) il existe trois manières de représenter les informations (expériences) : le mode enactif, le mode iconique et le mode symbolique.

Le mode enactif traduit l'apprentissage de l'information par l'action corporelle. Les données sont tangibles et accessibles par contact. L'exemple du bâton de l'aveugle cité précédemment est un mode de représentation enactif puisque l'aveugle se crée une image mentale de la situation par la perception de l'environnement via le bâton. Ce mode de représentation évolue en relation avec la dextérité de l'individu et implique pleinement la perception tactilo-kinesthésique (cf. 2.2.4) : « apprendre à faire de la bicyclette ou à nouer des lacets sont des exemples typiques » (Barth 1985). Nous écartons ce choix de

représentation puisqu'il implique « trop » les sensations des pilotes. Bien qu'ils apprennent à contrôler les sensations (cf. 2.2.4), ils apprennent simultanément à s'en méfier afin d'éviter les illusions sensorielles par rapport à la conscience de la situation (Letondal et al. 2018)⁹.

Le mode iconique désigne la représentation par l'image d'une expérience. Elle utilise exclusivement la perception oculaire. Contrairement au mode enactif, chaque information de l'image peut contenir une réalité indépendante de l'action, et perdurer après elle. C'est le mode de représentation principale que nous choisissons pour afficher les dimensions des gestes. Déjà présent avec les afficheurs des postes de pilotage, ce type de représentation permet d'externaliser des données. Celle-ci sont actuellement avioniques (cf. 1.2.2 & 2.2.4) cependant nous faisons l'hypothèse qu'il est possible d'afficher par l'image des représentations basées sur la singularité des comportements gestuels. De plus, nous favorisons ce mode de représentation car il peut renseigner des informations pré-attentivement, c'est-à-dire en les comprenant d'un simple coup d'œil, sans pour autant qu'elles soient définissables : « l'enfant est capable de distinguer un carré d'un rectangle, mais sans arriver à formuler les raisons de cette distinction » (Barth 1985).

Le mode symbolique désigne le passage de représentation iconique en une représentation abstraite : « le système symbolique représente les choses par des symboles qui sont déconnectés et arbitraires. Un mot ni ne désigne son signifié du doigt, ni ne lui ressemble comme une image » (Barth 1985). Ce type de représentation s'éloigne de la perception de la scène en temps réel car il est entièrement détachable de la situation (e.g. comprendre une situation sans y avoir assisté grâce à un compte rendu). Nous choisissons ce mode de représentation en complément du mode iconique afin de faire converger les dimensions des gestes numériques avec les informations avioniques.

3.1.3 Enrichir la vision focale pour suppléer la vision ambiante

En accord avec notre analyse des gestes des pilotes (cf. 2.3) et de l'activité (cf. chapitre 2), nous proposons de travailler des représentations de type iconique (incluant des données symboliques) pour suppléer, et non substituer, les gestes des pilotes au profit de la conscience mutuelle dans le cas des interactions tactiles.

La perception des gestes agissant sur les fonctions avioniques des coéquipiers dans le poste de pilotage s'effectue principalement par le regard (en dehors du manche avec le retour physique de l'*active sidestick* depuis le crash 447 Rio-Paris). Même si des interactions tactiles existent et qu'elles impliquent une plus grande attention, les gestes sont toujours présents dans l'espace partagé du poste de pilotage. Les pilotes continuent de « percevoir » l'autre

⁹ Ce constat est également issu d'un travail avorté sur la modélisation de « sensations » produites par des ultrasons. Il est apparu rapidement dans ce projet, à la vue de nos capacités de développement et de matériel, que les retours haptiques étaient trop faibles pour être intégrés à un environnement comprenant de fortes turbulences (cf. 4.2).

sans avoir la même qualité visuelle d'information (cf. 1.4.3). Cet accès à l'autre s'effectue principalement en vision ambiante (périphérique) avec des focus ponctuels en vision centrale lorsque les gestes actionnent des fonctions plus critique (irréversibles). Le choix de la suppléance permet de rapprocher ces informations en vision centrale (face aux pilotes) pour éviter aux pilotes d'une part de ne plus avoir leurs tâches dans leurs champs de vision, d'autre part de ne pas perdre de charge cognitive en cherchant à comprendre les interactions du coéquipier.

A titre de contre-exemple, si nous avons pris le cas d'un poste de pilotage séparé en deux (équipage séparé en deux, un au sol et un dans l'avion) comme cela peut être le cas avec le concept du *Single Pilot Operation* (SPO) alors nous aurions probablement opté pour la substitution puisque dans cette configuration la perception des gestes n'est plus accessible naturellement (elle a nécessairement besoin d'un artifice de représentation externe).

3.2 ÉTAT DE L'ART SUR LES REPRÉSENTATIONS GESTUELLES

Dans ce sous-chapitre nous présentons les différentes manières de représenter les gestes utilisés par la littérature spécialisée dans le travail collaboratif distribué (à distance) et co-localisé. La première catégorie oblige les utilisateurs à visualiser les gestes uniquement par le biais de la représentation numérique. Il s'agit de substituer la présence des utilisateurs à distance. A l'inverse, la seconde catégorie s'enrichit de la vision du geste présent dans l'espace vis-à-vis des interactions numériques. Le geste est suppléé afin d'être perceptible pour tous les utilisateurs. Compte tenu des besoins des pilotes, nous nous intéresserons à ces deux domaines. En effet, même si les pilotes partagent un espace co-localisé, leur besoin en matière de conscience mutuelle correspond plutôt à une collaboration à distance. En accord avec la séparation des tâches, ils doivent agir et regarder dans des directions parfois opposées tout en assurant une coordination. Cette forme de collaboration est proche de la collaboration mixte (Doucette, Gutwin, and Mandryk 2015), qui se produit lorsque les gens divisent le travail, exécutent les tâches assignées individuellement, puis se réunissent pour fusionner leurs résultats.

Au regard de l'état de l'art, nous proposerons par le biais d'une discussion de mettre en écho l'influence artistique sur l'imitation de la nature avec la représentation des gestes basée sur la morphologie des utilisateurs, couramment utilisée par la littérature spécialisée. D'une part ce parallèle entre les disciplines nous permet de comprendre les motivations de ce type de représentation d'un point de vue dépassant le cadre informatique, d'autre part cela nous permet d'apporter des arguments pour envisager de concevoir « différemment » la représentation des gestes. Au terme de ce sous-chapitre, nous présenterons une discussion en énonçant les limites de la représentation morphologique et en affirmant notre choix d'envisager une autre manière de représenter le geste qui soit plus en adéquation avec les besoins des pilotes.

3.2.1 Cas de substitution en situations distribuées

Dans le cadre d'un travail collaboratif distribué, ou dit : à distance, les utilisateurs travaillent ensemble à l'accomplissement de tâche commune. Ils doivent avoir une conscience mutuelle des agissements de l'autre pour assurer des tâches collaboratives. Pour y parvenir et compte tenu de la différence de localisation des utilisateurs, nous avons recensé deux principaux procédés de représentations différents : les représentations dynamiques de substitution basées sur des dessins ou des projections filmées des gestes du corps (partiel ou total) de l'utilisateur ; les représentations des gestes sous la forme de télépointeur.

Représentations dynamiques de substitution des gestes par une analogie au corps

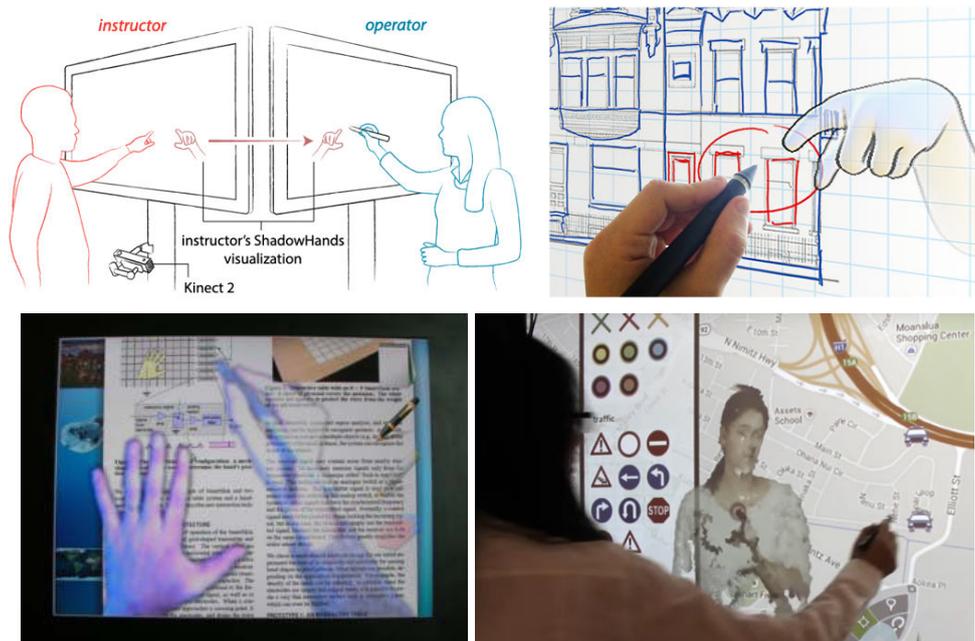


Figure 45. Premier rang : ShadowHand par Wood et al., 2016.

Deuxième rang à gauche : C-Slate par Izadi et al., 2007. A droite : 3D-Board par Zillner et al., 2014.

La première catégorie que nous présentons contient des représentations basées principalement sur une analogie au corps humain. Le geste peut être suggéré par représentation de l'ombre de la main et du bras (Izadi et al. 2007; Pauchet et al. 2007; Wood et al. 2016) (cf. Figure 45) ou bien être affiché en occultant les informations déjà présentes sur l'écran (J. C. Tang and Minneman 1990; Zillner et al. 2014)(cf. Figure 45). Ces représentations sont dynamiques et captées par caméra. De ce fait, elles sont actualisées en temps réel (en accord avec les capacités technologiques des dispositifs) et peuvent impliquer l'illustration d'une trace pour signifier le mouvement du geste (Yamashita et al. 2011)(cf. Figure 46).

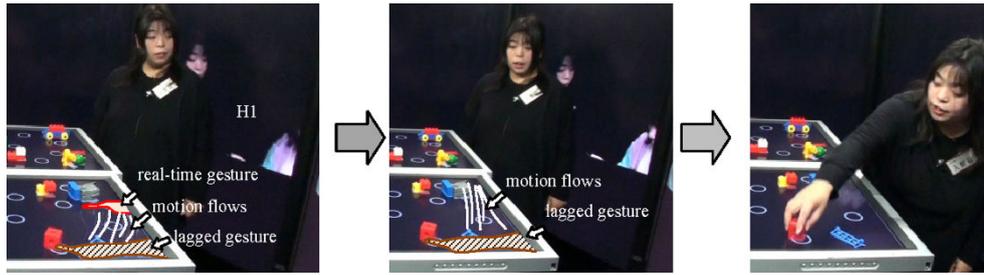


Figure 46. Représentation d'une trace de la main par Yamashita et al. 2011.

L'effet dit « miroir » (Ishii and Kobayashi 1992) (cf. Figure 47) constitue le paroxysme de la représentation de substitution de l'autre puisqu'il s'agit de reproduire une vue en temps réel (par caméra) de l'autre. Ishii (Ishii and Kobayashi 1992) propose d'afficher en fond d'écran une vue des agissements de l'utilisateur à distance grâce à une caméra fixée au-dessus des surfaces interactives des utilisateurs. L'angle de la caméra permet d'avoir les mouvements gestuels à partir du dessus du bassin (impliquant les bras, les mains, la posture du torse et des épaules et la face de la tête). En reprenant ce concept Kirk (Kirk, Crabtree, and Rodden 2005) focalise la caméra uniquement sur les gestes des bras et des mains donc sur l'espace d'interaction afin d'aiguiller le regard sur les opérations à réaliser. Alem (Alem and Li 2011) affiche un focus sur les gestes et propose en même temps une vision de la tête par caméra de l'utilisateur à distance (cf. Figure 47). Enfin, Tang (Anthony Tang et al. 2010) propose de dissocier l'affichage par caméra de la tête des utilisateurs à distance des représentations des gestes numériques affichés sur la surface d'interaction (cf. Figure 47).

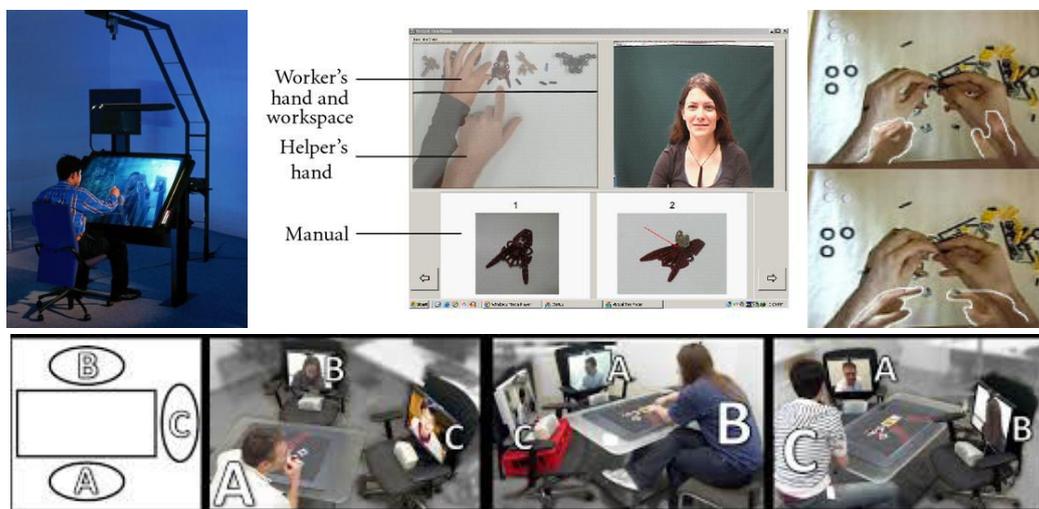


Figure 47. Premier rang à gauche : ClearBoard par Ishii et al., 1992 ; au milieu : Vidéo en temps réel des gestes à distance, Alem et al., 2011 ; à droite : Kirk et al., 2005. Deuxième rang : Projet de représentation hybride entre la représentation dynamique des gestes sur la surface interactive et une vidéo des utilisateurs à distance par Tang et al., 2010.

Télépointeurs

Une autre partie de la littérature spécialisée propose de représenter le geste uniquement en tant que pointeur directement sur le système, comme pour le projet *Put-That-There* (Bolt 1980) (cf. 2.1.1.A). Il s'agit d'un indice visuel, de type curseur, répondant au principe du geste déictique (cf. 2.1.2.G). Greenberg (S. Greenberg, Gutwin, and Roseman 1996) relève la diversité dans la forme des curseurs : couleur, nom, iconographie et choix d'image arbitraire ou métaphorique (cf. Figure 48). Il identifie quatre informations apportées par les curseurs : l'identité de l'utilisateur réalisant le geste (e.g. avec le nom textuel ou une photographie), l'action engagée (e.g. changement de couleur du curseur pour signifier un clic de souris), un statut de l'interaction (e.g. variabilité de la taille ou de la couleur en cohérence avec une interaction contenant plus de deux trois états), la trace (similaire à celle présentée précédemment). La trace peut être représentée de manière continue ou avec un effacement progressif relatif au temps (A. Tang, Neustaedter, and Greenberg 2007; Hurter et al. 2009) (cf. Figure 48). Le curseur peut être associé à la représentation dynamique de la main. Kim (Kim et al. 2019) propose une étude comparative entre trois représentations : un télépointeur (curseur), une trace (qu'il distingue du curseur) permettant de dessiner et une représentation dynamique de la main (cf. Figure 48). L'étude montre que les utilisateurs réalisent plus rapidement leurs tâches avec la combinaison de la trace et de la représentation dynamique de la main sans le télépointeur.

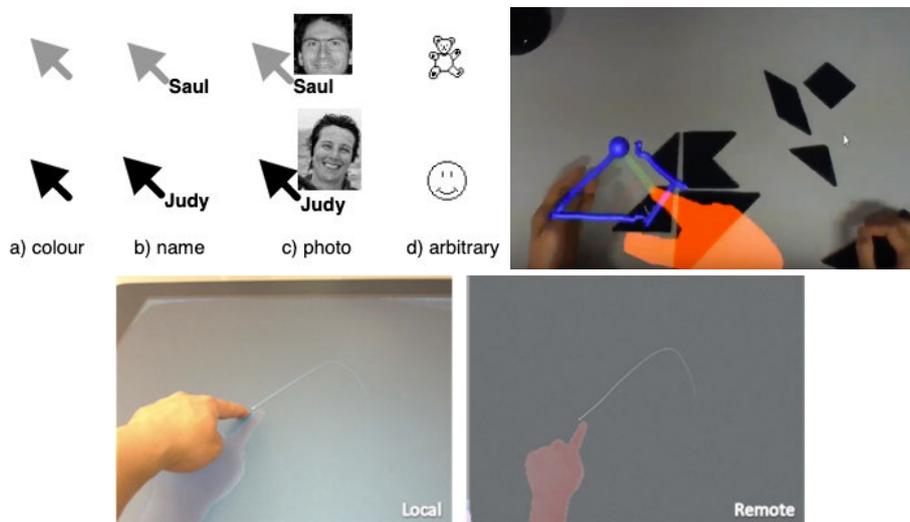


Figure 48. Premier rang à gauche : Les quatre formes de curseurs proposés par Greenberg et al. ; à droite : Le projet de Kim et al. montre un utilisateur en train de construire un origami. Il est assisté par un utilisateur à distance. La dynamique de ses gestes est représentée par un curseur signalé par une boule bleue et suivi par une trace représentée par le trait en 3D bleu, tandis que la représentation dynamique de ses mains est montrée par une couleur orange avec une légère opacité ; Deuxième rang : Représentation de la trace pour signifier le déplacement du geste par Tang et al., 2007.

Nous aborderons les limites de ces représentations en section 4.2.4 après avoir présenté au préalable les modes de représentations utilisés en situations co-localisées.

3.2.2 Cas de suppléance en situations co-localisées

Les représentations des gestes dans le cadre d'un travail co-localisé sont semblables aux représentations utilisées pour le travail distribué : les représentations sont basées sur la morphologie des utilisateurs et les représentations des gestes en tant que pointeur. Nous intégrons dans cette section des travaux de collaboration co-localisées de même que les travaux de collaboration mixtes (cf. 3.2).

Les représentations basées sur la morphologie des utilisateurs permettent d'avoir, par le biais d'une suppléance, une conscience sur les agissements des autres utilisateurs autour d'un dispositif co-localisé. Tang (Anthony Tang, Neustaedter, and Greenberg 2004) propose quatre clés de conception pour concevoir des représentations mixtes (situation distribués et co-localisés) :

- Les utilisateurs en situation co-localisée doivent avoir une représentation de leurs gestes au même titre que les représentations des gestes des utilisateurs à distance.
- Il faut favoriser une représentation de « high fidelity » pour les gestes en intégrant des mécanismes d'entrées aux dispositifs directement (pour réduire le délai de latence). Tang exclue les télépointeurs et les avatars qu'ils jugent trop « poorly » (Anthony Tang, Neustaedter, and Greenberg 2004, 6) puisqu'ils n'incluent pas suffisamment d'informations sur le comportement gestuel des utilisateurs.
- Il faut favoriser les représentations affichant les corps des utilisateurs afin de restituer les expressions des gestes.
- Il faut positionner les représentations dans un contexte commun aux différentes surfaces interactives des utilisateurs à distance afin que les utilisateurs puissent comprendre la cohérence entre leurs gestes techniques (non pris en compte par le dispositif) et leurs gestes numériques (identifiés par le dispositif et affichés sur l'écran).

Tang considère que les représentations basées sur la morphologie humaine, par l'utilisation de la vidéo, remplit ces critères. Une étude avec 22 participants de profil étudiant (A. Tang, Neustaedter, and Greenberg 2007) montre néanmoins que la contrainte technologique pour afficher une représentation visuelle de haute qualité est un frein en matière d'utilisabilité (limites technologiques et problème d'occultation cf. 2.1.1) notamment par rapport à l'expressivité des gestes. En effet, les utilisateurs ont accentué intentionnellement leurs gestes afin de s'assurer qu'ils étaient correctement compris par les utilisateurs à distance. Au-delà des problèmes techniques d'affichage, l'étude a montré que l'analyse des gestes produits par les utilisateurs à distance a exigé, de la part des utilisateurs observateurs, une grande attention sélective (cf. 1.2.1). L'étude de Pinelle (Pinelle et al. 2008) demande à 21 participants groupés par équipe de 3 de comparer sept modes de représentations de geste (six représentations graphiques et une sans représentation, c'est-à-dire par contact direct sur l'objet d'intérêt) : trait, flèche au premier plan, flèche en fond, curseur, flèche, bras avec main (cf. Figure 49). Pour ce faire, les utilisateurs doivent trier des images à l'aide d'un stylo numérique sur une table interactive, soit en respectant une zone d'interaction

présente en face d'eux (ce qui active les six représentations graphiques), soit en agissant par contact direct sur les images.

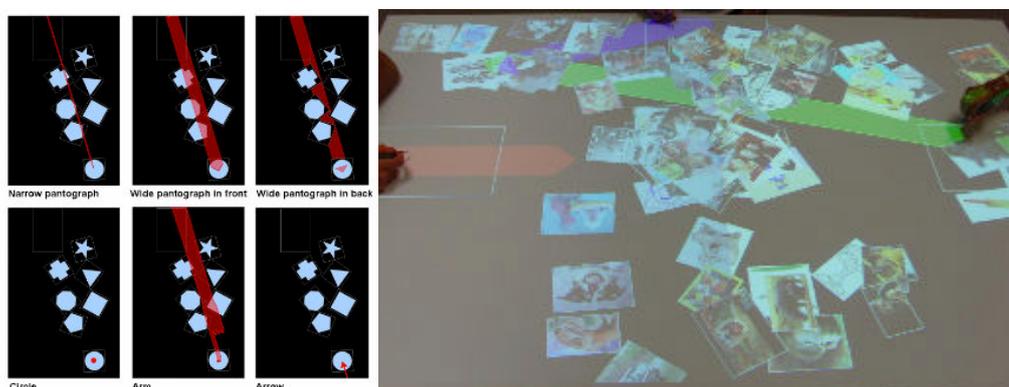


Figure 49. A gauche, déclinaison de représentation des gestes en situation co-localisée ; A droite, mise en situation avec des utilisateurs par Pinelle et al., 2008.

Vis-à-vis de la conscience mutuelle, bien qu'il n'y ait pas de différence significative, les participants ont préféré majoritairement la représentation du bras avec la main par rapport aux autres représentations graphiques parce qu'ils ont trouvé qu'elle représentait « an extension of their own arm » (Pinelle et al. 2008, 8). Cependant, cette étude montre également que les participants ont besoin d'avoir une vision des gestes techniques pour anticiper et comprendre pleinement les intentions des autres participants. Doucette (Doucette, Gutwin, and Mandryk 2015) confirme ce fait en établissant une étude comparative entre divers modes de représentations (présentés jusqu'à présent : pointeur en forme de bras avec main, curseur, effet « miroir » par vidéo). Il constate que les représentations des gestes numériques (cf. Figure 50) ne suffisent pas à assurer la conscience mutuelle nécessaire à l'établissement d'une coordination performante : « The visual representation alone is not strong enough to cause people to treat arm embodiments as they treat physical arms, and augmented embodiments lose some of their power to promote awareness and coordination when deployed in distributed environments » (Doucette, Gutwin, and Mandryk 2015).

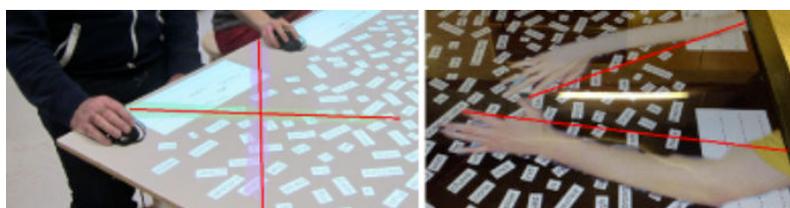


Figure 50. A gauche, une représentation des bras et des mains et à droite une représentation par caméra par Doucette et al., 2015.

Malheureusement, cette étude constate que les participants s'isolent dans leurs tâches, peu importe la représentation choisie : « The results were more extreme than for any previous studies – none of the different embodiment designs made any difference to behavior in our loosely-coupled task, and it was clear that people acted as though the other person did not

even exist. This suggests that it is may be more difficult to support natural awareness mechanisms and well-practiced social protocols at distributed tables than in other remote-groupware settings, because tabletop collaboration may be more dependent on these subtle cues » (Doucette, Gutwin, and Mandryk 2015)¹⁰. Comme pour les représentations utilisées en situation de collaboration à distance, nous aborderons les limites de ces représentations en section 4.2.4.

3.2.3 Influences de l'art figuratif sur la représentation gestuelle

Nous proposons une analogie entre le modèle dominant de représentation des gestes basées sur la copie de la morphologie du corps humain et l'art figuratif. En effet, en cohérence avec les possibilités technologiques des outils de capture, le geste est représenté en reproduisant la forme morphologique du corps humain. Dans le domaine de l'histoire de l'art - plus spécifiquement celui de la peinture - ce courant de représentation respecte la notion dite « *de natura* » (Arasse 1992), c'est-à-dire, lorsque le geste physique apparaît perceptivement à l'œil humain tel qu'il est défini par la « nature » (sans modification artificielle). L'intention de l'art figuratif est de copier fidèlement les détails (e.g. les lignes, les courbes, les proportions, les couleurs) d'un sujet. Il existe deux niveaux de reproduction concernant la notion de fidélité de représentation (Arasse 1992). D'une part, la copie ou « *ritrarre* », dont l'objectif est de respecter fidèlement la réalité sans en altérer le moindre détail. C'est par exemple le cas avec la toile du peintre de la renaissance italienne Jacopo Robusti, dit le Tintoret : Tarquin et Lucrece (entre 1580 et 1590) (cf. Figure 51). Les gestes des sujets sont représentés comme ils apparaissent dans la réalité. D'autre part, l'imitation ou « *imitare* », où cette fois, celui qui dessine prend la liberté créatrice de modifier la réalité. C'est par exemple le cas avec l'acrobate bleu de Pablo Picasso peint en 1929 (cf. Figure 51). Contrairement à l'œuvre de Tintoret, le comportement gestuel de l'acrobate est suggéré par l'auteur et laisse une part de liberté à l'imaginaire du spectateur. On observe que le placement des membres n'est pas rationnel sur le plan de l'anatomie et des proportions humaines. Pourtant, c'est précisément grâce à ce positionnement des membres et à leurs courbures que les mouvements des gestes sont apparents.

¹⁰ Par ailleurs, nous mentionnons un fait que nous ne développerons pas puisqu'il s'éloigne de notre problématique sur le choix de représentation. Les études de Pinelle et Doucette constatent également des problèmes de compréhension des représentations des gestes dès lors qu'elles manipulent des objets en dehors de l'espace naturellement atteignable par les gestes techniques des utilisateurs. L'article de Greenberg et Gutwin (Saul Greenberg and Gutwin 2016) présente ce problème et l'assimile à la notion de proxémie. Il s'agit des rapports culturellement établis décrivant les distances réelles entre un individu et les objets qui l'entourent. Dans le cas d'une représentation numérique, ce rapport n'existe plus donc les utilisateurs doivent reconstruire un nouveau rapport adapté à l'espace d'interaction.



Figure 51. A gauche, Tarquin et Lucrece par Tintoret (entre 1580 et 1590) ; A droite, L'acrobate bleu par Picasso (1929).

Plus généralement, ces deux niveaux font références à la notion de *mimesis* énoncée par Platon (Platon and Traduction de Leroux 2002, chap. X, 595b-598d) et développée par Aristote (Aristote, Traduction de Dupont-Roc, and et Lallot 1980, chap. XV, 54b). L'antiquité grecque offre deux exemples opposés de réflexions sur cette notion mises en œuvre par des peintres. L'un, Zeuxis, pousse au paroxysme la *mimesis* par l'imitation si exacte de la réalité visible d'une grappe de raisins que des oiseaux viennent les picorer. Son œuvre est un trompe-l'œil, un mensonge tellement parfait qu'il concurrence la nature. L'autre peintre, Apelle, questionne plus subtilement la *mimesis* : ne parvenant pas à représenter la douleur de la mère d'Iphigénie en peignant de manière réaliste les traits de son visage, il choisit de le couvrir d'un voile (Iphigénie est une jeune fille sacrifiée aux dieux pour favoriser le voyage de son père, le roi Agamemnon, vers la ville de Troie). Ce procédé met à distance l'imitation visible, mais ouvre un espace inattendu vers l'invisible, en laissant l'imagination du spectateur voir ce qu'il veut, d'après son expérience de la souffrance humaine.

Nous avons présenté cette dualité de l'interprétation de la *mimesis* parce que nous ferons le choix de favoriser l'imaginaire des gestes auprès des pilotes dans la production de nos représentations (cf. chapitres 5 et 6). En effet, nous pensons que le modèle de représentation dominant s'inspirant de la première interprétation du *mimesis* (par l'imitation exacte de la réalité visible) ne correspond pas à nos besoins de conception pour plusieurs raisons que nous évoquerons ultérieurement (cf. 3.2.5).

3.2.4 Les limites des représentations morphologiques

Nous avons analysé les représentations des gestes utilisées pour des interactions en milieux distribués (cf. 3.2.2) et en milieux co-localisés (cf. 3.2.3). Une grande partie de ces représentations affichent les gestes des utilisateurs en choisissant le principe de morphologie, c'est-à-dire une copie fidèle du corps humain. Cependant, bien qu'elles

soient plus performantes que les représentations des gestes par télépointeurs pour assurer une conscience mutuelle (Anthony Tang, Neustaedter, and Greenberg 2004; Kim et al. 2019), ces représentations comportent des limites par rapport à notre intention de construire un système pré-attentif requis par les exigences de l'activité de pilotage (cf. 1.2.4). Nous proposons quatre limites : l'espace d'interaction commun, l'encombrement visuel accompagné de l'occultation des informations avioniques, la contrainte créative et le problème posé pour restituer la singularité du comportement gestuel.

Espace d'interaction commun

Toutes les représentations que nous avons présentées ont en commun d'impliquer un partage de la spatialisation de l'espace d'interaction. Ce choix de conception permet de faire coïncider les gestes des utilisateurs à distance avec les informations présentes au niveau local. Cela favorise la contextualisation des actions (Kirk, Crabtree, and Rodden 2005; Koh et al. 2011). Cependant nous faisons l'hypothèse que cette copie des écrans n'a pas d'intérêt opérationnel (en dehors de l'argument sur la redondance des informations) puisqu'elle va à l'encontre des bénéfices produits par les interfaces tactiles (adaptation dynamique au rôle du pilote en fonction des tâches à accomplir, en cohérence avec la situation du vol). De plus, l'analyse de l'action par la représentation morphologique exige une grande attention cognitive de la part des utilisateurs (A. Tang, Neustaedter, and Greenberg 2007). Dans le cadre du travail à distance spécifique à l'aéronautique, l'étude de Ligda (Ligda et al. 2015) sur le développement d'outils de communication entre un pilote dans l'avion et un pilote au sol (concept de Single Pilot Operations) montre que les pilotes évaluent la représentation par effet « miroir » des gestes du co-pilote, cette représentation étant parfois distrayante¹¹ mais surtout trop contraignante en matière d'attention cognitive lors de situations non-nominales. Elles obligent les pilotes à interrompre leurs tâches pour analyser le comportement gestuel du co-pilote. Il n'y a pas de fluidité dans la construction du travail collaboratif ce qui provoque une accentuation de l'usage de la parole.

Encombrement visuel avec occultation des informations avioniques

Dans la continuité de la précédente limite, nous soulevons le problème de l'efficacité de la lisibilité par l'obstruction des informations (e.g. superposition, masquage). Même lorsqu'il apparaît avec une transparence élevée, l'affichage du corps humain sur l'écran diminue la perception des informations superposées. Or, il n'est pas envisageable en matière de sécurité de cacher des informations avioniques au bénéfice de la représentation gestuelle. L'information avionique prime sur l'information gestuelle notamment parce que les pilotes ne font pas confiance à leurs propres sensations et qu'ils se fient d'abord aux informations des instruments de bord (cf. 2.2.4). De plus, la séparation des tâches pour assurer la mission

¹¹ Nous ajouterons à l'adjectif distrayant que la perception du mouvement attire le regard (cf. 1.2.2) ce qui peut provoquer un risque de trouble dans l'accomplissement des balayages visuelles ou dans le suivi d'une tâche spécifique.

du vol conduit à une distinction d'attention sélective entre les deux pilotes (cf. 1.2.1). Ils n'ont pas besoin d'avoir les mêmes informations sous les yeux. En d'autres termes, la précision de l'action engagée par un pilote ne correspond pas forcément à l'information recherchée sur les écrans par son collègue. Une solution, pour éviter cela, pourrait être l'usage des représentations associées aux télépointeurs, notamment l'utilisation des curseurs du fait de leurs petites tailles¹². Néanmoins avec l'interaction tactile, ils imposent tout de même la duplication totale des écrans pour pouvoir contextualiser les gestes. De plus, ils sont limités en matière d'informations sur le comportement des gestes (Anthony Tang, Neustaedter, and Greenberg 2004). Toutefois, afin d'évaluer notre hypothèse sur l'intérêt de la spatialisation, nous avons proposé ce type de représentation pour notre premier design (cf. 5.4.1).

Contrainte créative

La représentation des gestes d'après leurs aspects morphologiques impose une contrainte créative. Bien sûr, il est possible de décliner la texture de l'affichage : transparence, contour, ombre, taille, gradient de couleur, tatouage (Genest et al. 2013) (cf. Figure 52). On peut aussi choisir une qualité de résolution de la visualisation adaptée pour atteindre tantôt une *Mimesis* d'imitation parfaite du corps (limitée aux capacités technologiques des dispositifs numériques (cf. 2.1.1)) tantôt une représentation synthétique du squelette (cf. Figure 52).



Figure 52. A gauche et au milieu, texture ajoutée de gradient de couleur puis tatouage par Genest et al., 2013 ; A droite, représentation du squelette des mains avec le dispositif leapmotion.

En conséquence des deux précédentes limites, nous pensons que la représentation par la morphologie n'est pas adaptée aux besoins opérationnels des pilotes. Dans l'hypothèse où la spatialisation n'est plus nécessaire, nous pouvons explorer par le design graphique d'autres manières de représenter les gestes. Par ailleurs, nous pensons que ces représentations ne permettent pas de faire « converger » de manière pré-attentive les informations des gestes avec les informations avioniques. En effet, comme nous l'avons déjà

¹² Nous noterons que les pilotes travaillant dans des postes de pilotage de type : interactives cockpits, travaillent déjà avec ce type de représentation grâce au KCCU (cf. 1.4.1). Cependant, ce dernier ne permet pas d'agir sur des fonctions avioniques présentes sur le panneau de contrôle en tête haute (Overhead panel) mais plutôt de naviguer entre les menus des afficheurs et de rentrer des informations sur le vol (e.g. plan de vol, suivi de checklist, etc.).

mentionné dans la limite consacrée à l'espace d'interaction commun, la lecture du geste par ce type de représentation requiert une grande attention cognitive. Nous reviendrons plus en détail sur la notion de « convergence » dans la section 4.3.2.

Problème pour restituer la singularité du comportement gestuel

La dernière limite que nous exposerons concerne la restitution des détails constitutifs de la singularité des comportements gestuels. En 1934, Henri Focillon décrit l'humanité des individus à travers ce que nous avons nommé la singularité des gestes.

« La main se sent tout de même dans l'effort qu'elle fait pour servir, dans sa circonspection, dans sa modestie. Elle pèse sur le sol, elle s'arrondit sur la cime des arbres, elle se fait légère dans le ciel. L'œil qui a suivi la forme des choses et supputé leur densité relative faisait le même geste que la main [...] Quand on sait que la qualité d'un ton, d'une valeur, dépend non seulement de la manière dont on les fait, mais de la manière dont on les pose [...] Tel est l'avenir de la main, jusqu'au jour où l'on peindra à la machine, au chalumeau : alors sera rejointe la cruelle inertie du cliché, obtenu par un œil sans main, et qui heurte notre amitié en la sollicitant, merveille de la lumière, monstre passif. » (Focillon 1943, p116)

Ces détails sont des informations transmises par les gestes qui témoignent à la fois de l'expressivité et de la physicalité des individus. Ces indices sont complémentaires. Ils enrichissent la compréhension des gestes. Dans son article, Doucette (Doucette, Gutwin, and Mandryk 2015) montre que les représentations morphologiques ne parviennent pas à restituer la physicalité des gestes. L'explication de ce phénomène est complexe. Néanmoins une solution est proposée par les auteurs. Il s'agit de modéliser les gestes et de les représenter par des bras robotiques afin de retrouver la physicalité. Cette proposition expose clairement les limites de la représentation par la morphologie des gestes pour afficher la singularité des gestes.

Au regard de ces quatre limites, nous écartons la représentation morphologique des gestes pour proposer une nouvelle « manière » de représenter les gestes qui soit accessible pré-attentivement par les pilotes.

3.3 MONTRER L'EXPERIENCE GESTUELLE

Pour construire une nouvelle proposition de représentation des gestes qui ne soit pas basée sur l'analogie morphologique, nous nous appuyons en premier lieu sur le courant représentationnaliste. Ce courant démontre qu'il est possible de restituer la singularité du comportement gestuel à l'écran grâce au concept de *Qualia*. De plus, ce courant nous permettra d'identifier la notion « d'effet » des gestes à laquelle nous donnerons deux sens : l'effet en tant que trace du déroulé de l'action et l'effet en tant qu'indice signifiant le résultat. Nous poursuivrons avec un questionnement sur notre intention de « convergence » des informations afin de proposer un affichage pré-attentif. En effet, dans le sous-chapitre précédent, nous avons argumenté notre intention de représenter le geste indépendamment

d'une représentation morphologique en adéquation avec la contrainte de pré-attentivité. Néanmoins, dès lors que l'on représente un geste de façon abstraite, est-ce que l'on peut déconstruire graphiquement le geste en un ensemble dissociable de dimensions tout en conservant la notion commune d'association à un geste unique ? Pour y répondre, nous décrirons brièvement la notion de matérialité du geste et la notion de totalité. Puis nous exposerons le besoin de montrer cette convergence aux pilotes en nous appuyant sur des concepts du philosophe Gilbert Simondon.

3.3.1 Le représentationnalisme ou l'importance de montrer l'expérience gestuelle

Dans notre travail, nous nous intéressons à la théorie Représentationnaliste apparue dans les années 1990 et développée par Fred Dretske (Fred Dretske 1995). L'auteur développe une théorie selon laquelle l'individu comprend les expériences au travers des représentations des faits éprouvés, c'est-à-dire des expériences consciemment vécues. Chaque élément constitutif d'une représentation permet de faire vivre une expérience consciente, « conscience phénoménale » (Block 1995), chez un individu. Ce dernier peut, par le biais d'une image réelle ou reproduite (Benjamin 1936) éprouver des sensations par rapport à un objet, à un milieu ou à un outil parce qu'il a déjà eu des sensations directement associées ou à défaut s'en rapprochant. Dretske exploite son concept d'occurrence entre l'intentionnalité et le résultat phénoménologique sur l'expérience. Pour lui, ces deux temps constituent des états d'être, ou des états mentaux. Le premier temps correspond à l'annonce ou à l'obtention de l'information, tandis que le second correspond à l'appropriation de l'information par le cerveau. L'appropriation est relative à chaque individu en fonction de ce que F. Dretske nomme des *qualia*¹³. Il s'agit des associations d'émotions ou d'images mentales que nous affectons aux expériences vécues. Les *qualia* sont directement associés à l'expérience et ils ne doivent pas être confondus avec les croyances religieuses ou culturelles, les désirs, les intentions, la pensée conceptuelle. Ils définissent les « propriétés phénoménales » (Fred Dretske 1995, p73) permettant la qualification phénoménale de l'expérience. En cohérence avec l'étude de Nagel (Nagel 1974), Dretske détermine les *qualia* comme qualitatifs et subjectifs puisqu'ils diffèrent entre les individus et entre les espèces animales au sens large. L'expérience ne peut pas s'expliquer uniquement par la rencontre sensible des matières constitutives de l'être et de l'objet d'interaction dans un milieu. La singularité qualitative de l'esprit humain intervient. A cause de cela, Nagel considère qu'il est impossible de prévoir rationnellement « l'effet » de l'interaction.

La représentation d'un objet, matériel ou symbolique, par un médium sensoriel additionne des propriétés représentationnelles riches d'informations détaillées perceptibles avec un ou

¹³ Les termes *Qualia* (au pluriel) et *Quale* (au singulier) sont utilisés pour la première fois par le philosophe pragmatiste américain Clarence Irving Lewis dans son ouvrage *Mind and the World-Order* (1929).

plusieurs contenu(s) représentationnel(s). Le contenu représentationnel est ce qui est représenté. En d'autres termes, les propriétés représentationnelles constituent les signifiants de l'information et le contenu représentationnel correspond au signifié (De Saussure et al. 1916).

Limites de la théorie représentationnaliste

Cette théorie Représentationnaliste possède toutefois des limites par rapport à la notion d'illusion. F. Dretske affirme que l'état d'être de l'individu est conditionné uniquement par la représentation comprenant ses propriétés représentationnelles. « All mental facts are representational facts » (Fred Dretske 1995, p13). En effet, chaque contenu représentationnel est une fonction représentée par une propriété associée à l'intention de l'individu, qui détermine une définition complète des aptitudes du sujet à ressentir lors de l'expérience consciente « all representational facts are facts about informational functions » (Fred Dretske 1995, p13). Néanmoins, dans le cas d'une illusion d'optique par exemple, l'état d'être est automatiquement altéré par la qualité représentationnelle des propriétés. C'est pourquoi Dretske considère que la propriété représentationnelle est intrinsèque au sujet (à l'objet) observé. « This means that the properties we use to individuate experiences are the objective properties of the objects we experience, not the properties of the experiences themselves. We distinguish experiences not in terms of their properties, but in terms of the properties that their objects (if there are any) have » (F. Dretske 2003, p72). Pour celui qui n'opère pas directement le geste technique, c'est-à-dire, pour le spectateur du geste, les *qualia* sont des substituts lui permettant de ressentir des émotions durant une expérience.

Par rapport à notre futur travail de design, nous pensons que les *qualia* peuvent représenter les indices propres à la singularité des comportements gestuels. Dans notre travail de design (cf. chapitres 5 et 6) nous verrons que ces *qualia* peuvent être assimilés à certains effets des gestes que nous déterminerons comme des « effets d'impressions » (e.g. temporalité, rythme, trace).

3.3.2 Convergence de l'expérience gestuelle avec les informations avioniques

Nous pensons que pour atteindre la pré-attentivité, nous devons faire converger au sein d'un même affichage les informations provenant de l'expérience gestuelle des pilotes avec les informations avioniques. Cependant, est-il possible de décomposer la totalité du geste numérique en une liste de dimensions ? Par ailleurs, est-ce que l'on peut soustraire des dimensions des gestes dans la représentation en faisant comprendre malgré cela qu'il s'agit d'un geste numérique ?

Depuis le début de nos investigations, nous avons considéré le geste comme un objet matériel composé d'une association de dimensions formant une totalité unique. Étymologiquement la « totalité » est composée de deux expressions : l'*omnis* et le *totus*. L'*omnis* correspond au concept d'accumulation d'éléments dissociables formant un tout. La totalité accueille et réunit une quantité variable et extensible d'éléments. Chaque élément

est distinct et autonome. Parce qu'ils ont un intérêt commun, ces éléments cohabitent dans un même espace. Ils peuvent entrer et sortir de la totalité *omnis* sans affecter les autres éléments. A l'inverse la totalité *totus* renvoie à la notion d'intégralité ou d'indivisibilité. Ce type de totalité se caractérise par une entité finie, une intégralité fermée où le moindre élément participe à la totalité *totus*. La division de la totalité entraîne sa destruction. Nous retrouvons ces concepts chez le philosophe Gilbert Simondon avec la notion de convergence des fonctions. En effet, G. Simondon qualifie la totalité en s'appuyant sur l'expression « *partes extra partes* ». Il s'agit d'une expression employée par Descartes « entendue comme une description caractéristique de la matière : la matière est telle que les parties qui la composent sont comme extérieures les unes aux autres, et leur connexion reste toujours accidentelle, éphémère. Tout ensemble matériel n'est qu'un agrégat de parties qui restent fondamentalement séparables » (Macé 1998, p18). Nous prendrons l'exemple des moteurs de G. Simondon. Le moteur ancien est un moteur abstrait, « chaque élément intervient à un certain moment dans le cycle, puis est censé ne plus agir sur les autres éléments [...] (le moteur ancien) est un assemblage logique d'éléments définis par leur fonction complète et unique » (Simondon 1958, p24), le nouveau moteur est concret parce qu'il mêle les fonctions entre-elles. Nous avons cherché à mêler les propriétés du geste avec les informations avioniques. Ils ne doivent pas être « séparés » parce que « le problème technique est donc plutôt celui de la convergence des fonctions dans une unité structurale que celui d'une recherche de compromis entre des exigences en conflit » (Simondon 1958, p26).

En somme, ce que nous cherchons à faire c'est bien de faire converger des informations pour obtenir une vision harmonieuse afin de répondre à un fonctionnement de lecture performant. Par ailleurs, représenter l'expérience est une notion proche des statuts de majorité et de minorité développés par Gilbert Simondon.

Le statut de minorité correspond chez G. Simondon aux « objets d'usages ». Ce sont les objets du quotidien. Ceux que l'on rencontre tous les jours, dans tous les milieux et dans toutes les situations. Dès l'enfance, l'individu est confronté à la manipulation de ces objets. « Le savoir technique est implicite, non réfléchi, coutumier » (Simondon 1958, p123). A l'inverse, le statut de majorité renvoie à « une prise de conscience et à une opération réfléchie de l'adulte libre, qui a à sa disposition les moyens de la connaissance rationnelle élaborée par les sciences » (Simondon 1958, p123). Chez Simondon, ces deux statuts provoquent des chocs culturels entre l'artisan et l'ingénieur. Bien qu'ils soient tous les deux « témoins et agents de la relation entre la société humaine dans son ensemble et le monde des objets techniques dans son ensemble » (Simondon 1958, p124) il apparaît qu'ils conçoivent puis par extension comprennent différemment les objets techniques. L'artisan produit des objets abstraits parce qu'il n'aborde pas théoriquement la relation forme/matière. L'ingénieur cherche à concrétiser l'objet, mais il cherche aussi à penser « l'intériorité » (Simondon 1958, p331) de la technique.

En plus de faire converger l'expérience gestuelle et la réalité avionique, il apparaît évident que nous devons rendre visibles les processus opératoires aux yeux des pilotes afin qu'ils

puissent saisir en continu les corrélations entre les gestes et leurs effets sur le système avionique. Notre ambition n'est donc pas seulement de montrer la finalité de cette convergence, mais bien de rendre perceptible l'expérience gestuelle « en cours ». Il faut montrer « l'effet » du geste sur l'expérience au double sens du mot effet, c'est-à-dire à la fois ce qui favorise la réalisation de l'action mais également son impact sur l'expérience.

3.4 CADRE DE CONCEPTION POUR LA REPRESENTATION GRAPHIQUE

En complément des outils conceptuels énoncés précédemment (cf. 3.3) nous proposons dans ce sous-chapitre de présenter d'autres outils techniques pour concevoir notre système de représentation des gestes : les règles de représentation des gestes numériques proposées par Erin McAweeney (cf. 3.4.1), la Sémiologie Graphique (SG) de Jacques Bertin (cf. 3.4.2), les lois de la Gestalt (cf. 3.4.3) et les règles de design pour l'affichage (cf. 3.4.4).

3.4.1 Règles de représentation des gestes numériques pour l'apprentissage

A notre connaissance, il n'existe pas de règles de construction graphique pour la représentation des gestes dans le travail collaboratif co-localisé ou à distance. Cependant, dans le domaine des guides d'utilisations, l'article d' Erin McAweeney (McAweeney, Zhang, and Nebeling 2018) propose le premier cadre de représentation des gestes à destination des utilisateurs en déterminant des règles de représentations gestuelles pour les interactions gestuelles sur des surfaces tactiles. Ce travail est basé sur l'analyse de dessins dans la littérature spécialisée : les études de guessability pour l'interaction gestuelle. Ces études recensent d'abord les objets graphiques utilisés pour représenter les interactions gestuelles tels que les flèches, les ombres, les textes, les représentations corporelles, etc. (cf. Figure 53). Puis, l'étude de guessability est centrée sur l'utilisateur pour identifier les préférences de l'utilisateur final dans les représentations graphiques. Enfin, cinq dimensions gestuelles nécessaires à la compréhension visuelle sont relevées : le temps, la position, la posture, le mouvement et le toucher (le contact avec la surface).

Le temps évoque les « séquences » des mouvements corporels de l'utilisateur (corps entier ou partie du corps). Il est « communément » confondu avec le mouvement lorsqu'il est représenté par une flèche. La position représente la localisation du ou des points de contact pour produire l'interaction. La posture est la configuration de la forme que doit adopter la main pour produire l'interaction. Le mouvement représente la trajectoire du bras ou de la main sur la surface. Le touch représente le contact entre la main et la surface.

Dimensions de Erin McAweeney	Dimensions pour la conscience mutuelle
Touch	Identification
	Rôle
Position	Localisation
Temps	Temporalité
Mouvement	Mouvement
Posture	Intention
	Statut
	Trace
	Complétude

Figure 53. A gauche, les dimensions de la caractérisation pour la représentation des gestes par McAweeney ; A droite, notre cadre de dimensions gestuelles à représenter pour la conscience mutuelle des pilotes.

Bien que ce travail de représentation ne puisse pas être adapté à notre contexte compte tenu des différences d'intentions, il confirme toutefois la nécessité universelle d'afficher certaines dimensions aux yeux des utilisateurs (cf. Figure 53). Ce travail permet de distinguer entre les dimensions relatives à l'apprentissage des gestes et les dimensions relatives exclusivement à la conscience mutuelle liée à l'activité de pilotage. Bien que nous ne développons pas cette piste, nous pourrions par hypothèse, proposer des représentations spécifiques à la formation des pilotes en « accentuant » les dimensions soulignées par l'étude d'Erin McAweeney (Identification, Localisation, Temporalité, Mouvement et Intention).

3.4.2 La Sémiologie Graphique

La sémiologie graphique est un système de construction graphique définie par Jacques Bertin (Bertin 1967). Il permet d'établir une « image », c'est-à-dire un regroupement visuel d'informations accessibles cognitivement presque instantanément. Ce système, ou ensemble de sèmes graphiques, est un objet uniquement visuel qui représente au minimum une information. Il est composé de trois types de paramètres : les invariants, les composantes et les variables visuelles. Les invariants sont des éléments permettant la structuration de la lecture. Ils sont indépendants de l'information. Ce sont les éléments qui restent en fond et qui ne nécessitent pas une lecture actualisée. Les composantes sont le contraire des invariants. Elles forment le message, les informations transmises par le graphique. Enfin les variables visuelles, pour reprendre les termes de Bertin désignent « tout ce qui n'est ni les premières, ni les secondes, c'est-à-dire, ce qui est proprement graphique ». Avant de décrire les variables visuelles, il convient de noter que Jacques Bertin est un cartographe, raison pour laquelle il a formalisé un système pensé par rapport à une surface en deux dimensions sans notion d'animation propre à l'affichage numérique. Le code

graphique de Bertin propose donc huit variables, sur le plan des signifiants, pour traduire de façon visuelle l'information :

- Variations dans l'emplacement de la tâche de haut en bas (coordonnées spatiales) ;
- Variations dans l'emplacement de la tâche de gauche à droite (coordonnées spatiales) ;
- Variations dans la forme (géométrique ou « surface à contours complexe ou inédits ») ;
- Variations dans la taille (« du point à une vaste plage ») ;
- Variations dans la couleur ;
- Variations dans la valeur (nuances) ;
- Variations dans le grain ;
- Variations dans l'orientation.

Nous complétons ces variables avec celles de Leland Wilkinson (Wilkinson 2005) basées sur les écrans numériques :

- Variation par l'effet d'animation ;
- Variation par la transparence ;
- Variation par le flou ;
- Variations par la luminosité.

A cela, il faut aussi noter que chacune de ces variables visuelles s'intègre au contenu du graphique selon Bertin de façon soit ponctuelle, soit linéaire, soit zonale. Certaines variables visuelles ne sont disponibles qu'avec certaines sortes d'implantations. Il énonce donc les règles de compatibilités suivantes :

- L'implantation ponctuelle s'accorde théoriquement avec toutes les variables visuelles même si dans les faits ces mêmes variables sont conditionnées par la variation de taille ;
- L'implantation linéaire ne permet pas l'usage des variations dans l'orientation. Elle permet partiellement l'usage des variations de taille (curviligne) et de forme (largeur d'un trait). Le reste des variables est utilisable ;
- L'implantation zonale n'est pas compatible avec les variations de taille et de forme. Les variations dans l'orientation ne sont pas à proprement parler possibles bien qu'elles puissent être exploitées via le grain avec notamment l'orientation des hachures. Le reste des variables est utilisable.

Enfin, la sémiologie graphique introduit la notion de « niveau de variable », c'est-à-dire la capacité d'une variable à être associative (1), sélective (2), ordonnée (3) ou quantitative (4) (cf. Figure 54). Ces niveaux de variables permettent d'évaluer la qualité du graphique (cf. 3.4.3) :

(1) Une variable est « associative lorsque l'œil regroupe spontanément ses différents paliers, les voit ensemble, et n'oublie donc pas de les interpréter les uns par rapport aux autres ».

(2) Une variable est « sélective lorsque chacun de ses paliers est doué d'une forte individualité perceptive et ne manifeste aucune tendance à se confondre avec les autres paliers ». L'œil regroupe les différents paliers pourtant il les dissocie aisément.

(3) Une variable est « ordonnée lorsque le lecteur n'a pas besoin de regarder la légende pour savoir dans quel ordre se rangent ses différents paliers ».

(4) Une variable est « quantitative lorsque l'œil parvient aisément à établir une estimation des rapports mesurables qui unissent ses différents paliers ».

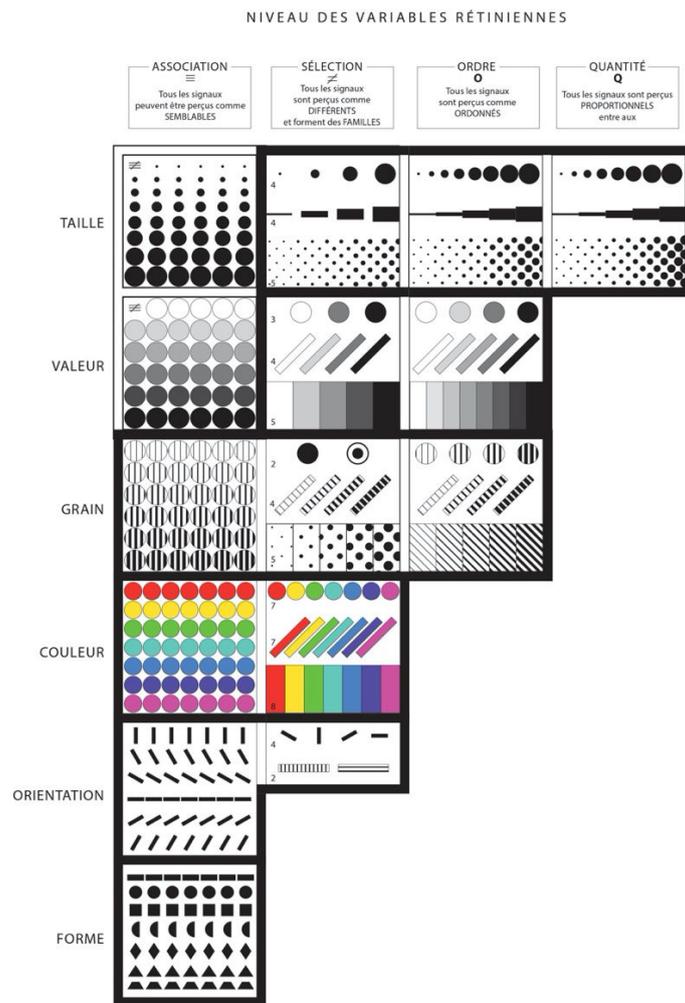


Figure 54. Niveau des variables rétiniennes par Jacques Bertin.

L'intérêt de connaître et d'identifier la diversité des variables visuelles, ainsi que leurs implantations respectives et leur niveau, nous est utile pour établir un graphique performant sur le plan de la rapidité d'acquisition de l'information recherchée. Ce qui nous intéresse, c'est que l'information soit accessible immédiatement donc pré-attentive. Jacques Bertin appelle cela : l'image. Il détermine son critère d'efficacité ainsi : « Si, pour obtenir une réponse correcte et complète à une question donnée et toutes choses égales, une

construction requiert un temps de perception plus court qu'une autre construction, on dira qu'elle est plus efficace pour cette question ». Nous approfondirons ce point ultérieurement (cf. 3.4.5).

3.4.3 La Gestalt

Pour construire une image, Bertin s'appuie dans l'établissement de ses règles sur la psychologie de la forme. La reconnaissance des objets dans un processus de perception visuelle s'opère au terme d'une synthèse. En 1935, l'allemand Kurt Koffka aborde ce phénomène et propose la théorie de la *gestalt*. Nous percevons d'abord une « sur-forme ». C'est-à-dire, une forme n'ayant pas de détail. La traduction du terme allemand *Gestalt* signifie « donner forme à quelque chose ». Cela résume le procédé cognitif qui appréhende la perception de la sur-forme. En effet, notre cerveau analyse le tout en opérant une décomposition de l'ensemble au profit d'une forme globalement signifiante. Cette théorie propose un ensemble de lois contraignant la perception visuelle :

- (1) La loi de bonne forme : explique qu'un ensemble de parties (comme des groupements aléatoires de points) tend à être perçu au premier abord comme une forme avec des propriétés de stabilité formelle.
- (2) La loi de proximité : définit le regroupement d'objets similaires proches les uns des autres.
- (3) La loi de continuité : statue qu'il est plus facile de construire des entités visuelles à partir d'éléments qui sont lissés et continus plutôt qu'avec des éléments qui comportent des angles, ou des changements de direction abrupts.
- (4) La loi de similitude : indique que les éléments visuels qui partagent les mêmes propriétés se groupent.
- (5) La loi du destin commun : définit que des parties en mouvement ayant la même trajectoire sont perçues comme faisant partie de la même forme.
- (6) La loi de clôture : montre qu'une forme fermée est plus facilement identifiée comme une figure (ou comme une forme) qu'une forme ouverte.
- (7) La loi de familiarité : le cerveau perçoit en priorité les formes familières.
- (8) La loi de séparation fond/forme : capacité de distinguer les formes sur leur fond.
- (9) La loi de symétrie : Les éléments symétriques d'une composition sont associés en un tout cohérent et signifiant.
- (10) La loi de prégnance : Les formes simples et nettes sont plus facilement et rapidement comprises et interprétées que les formes complexes. Dès lors, les formes géométriques ont notre préférence et la simplification des formes entraîne une amélioration de la rapidité de compréhension.
- (11) La loi de l'émergence : L'identification d'un objet se fait par comparaison avec des formes familières.
- (12) La loi de la réification : L'esprit comble le vide des éléments manquants pour reconstituer un tout.
- (13) La loi de la multi-stabilité : L'œil identifie un tout ou un autre tout. Jamais les deux à la fois.

(14) La loi de l'invariance : Un objet ayant été déformé, mis en perspective, changé d'échelle ou même changé de style sera reconnaissable et identifié comme le même objet.

Dans nos designs nous appliquerons certaines lois (e.g. la loi de proximité, la loi de l'invariance, la loi de la clôture, la loi de la continuité) pour produire des représentations pré-attentives.

3.4.4 Règles de performance visuelle pour atteindre la pré-attentivité

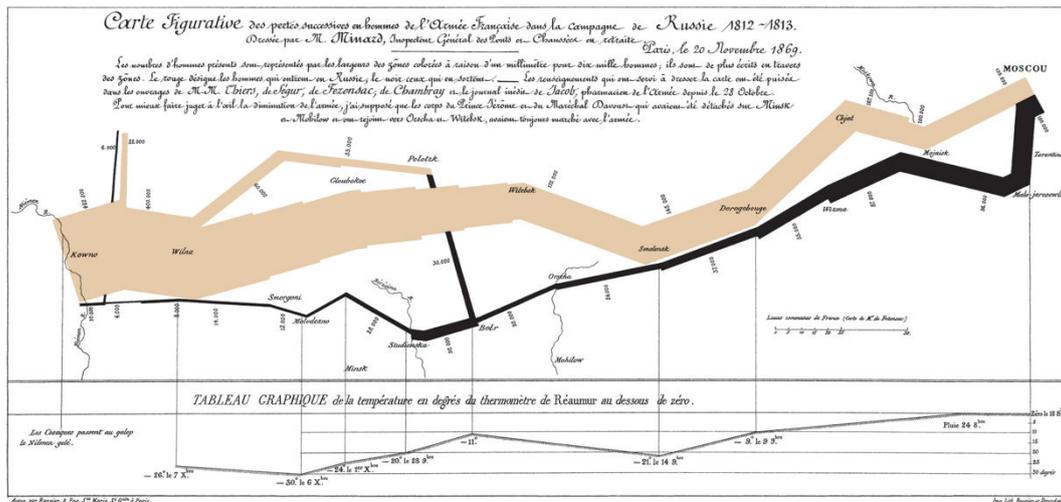


Figure 55. Carte représentant la perte des soldats de l'armée napoléonienne durant la campagne de Russie par Charles Joseph Minard, 1869.

Il n'existe pas à notre connaissance de solution universelle pour produire un système de représentation pré-attentif. Cependant, des règles ont été produites pour guider la conception vers cet objectif. Jacques Bertin propose trois niveaux de perceptions d'information pour atteindre l'« image » (Bertin 1967). Ces niveaux sont corrélés aux quatre niveaux de variables (associative, sélective, ordonnée et quantitative) présentées précédemment (cf. 3.4.1). Il y a le premier niveau, dit élémentaire, où l'œil ne perçoit qu'un seul niveau de l'information. Il n'arrive pas à discriminer les informations entre elles, cela correspond plus à une illustration d'ornementation. Le second niveau, dit moyen, permet de combiner des groupes d'éléments d'informations. Enfin, le dernier niveau, dit supérieur, désigne la perception de la totalité du graphique et correspond au concept d'image. L'objectif d'un graphique est d'atteindre ce dernier niveau. Dans notre travail de conception graphique, nous avons essayé de fusionner nos dimensions visuellement en combinant les variables graphiques et en respectant la cohérence entre le type d'information et le choix de variable graphique associé que nous présenterons au cas par cas lors de la présentation de nos designs. Tufle (Tufle 1983) propose également des règles pour assurer la performance visuelle d'une représentation graphique. Il détermine l'image (sans la qualifier ainsi) en énonçant : « un graphique d'excellence est celui qui donne à l'utilisateur le plus grand nombre d'informations dans le plus petit intervalle de temps avec le moins d'encre

dans le plus petit espace » (Tufle 1983). Les informations complexes doivent être « claires », « précises » et « efficaces ». De plus, comme pour Bertin, il favorise ce qu'il nomme « des données multidimensionnelles ». Pour illustrer ce fait, il prend l'exemple de la carte de Charles Joseph Minard conçue en 1869 et représentant la campagne de Napoléon Bonaparte en Russie (cf. Figure 55). Le déplacement des troupes de l'armée napoléonienne est représenté par deux lignes. L'une, caractérisée par une variable de couleur brune, représente le trajet aller vers Moscou et l'autre, noir, correspond au trajet du retour vers la France. La largeur des lignes représente le nombre de soldats valides de cette armée. Sans avoir besoin de données chiffrées, visuellement, on perçoit la diminution croissante du nombre de soldats. De plus, dans le même temps on visualise le déplacement des troupes sur une carte. Cette fusion des informations permet de visualiser plusieurs informations simultanément. Nous essayerons d'atteindre le même objectif de lecture rapide grâce à la conception de nos designs.

3.5 CONCLUSION

Nous avons déterminé dans ce chapitre les critères de notre mode de représentation. Il s'agit d'un afficheur graphique représentant les gestes sans ressemblances morphologiques avec les mains (et les bras) des pilotes. L'intention de notre afficheur est de suppléer graphiquement les gestes numériques des pilotes dans le poste de pilotage lorsqu'ils agissent sur des surfaces tactiles. Dans la mesure où ils apparaissent physiquement dans le même espace, et compte tenu des contraintes dynamiques des affichages (e.g. SVS), la représentation de la main n'apporte aucun avantage opérationnel. Dès lors, nous avons parcouru la notion de représentationnalisme et le concept de convergence pour comprendre s'il était possible d'envisager une représentation qui ne soit pas cohérente avec l'image d'un geste telle qu'elle apparaît à l'œil nu, mais plutôt de fusionner des informations avioniques avec des informations gestuelles afin de concevoir un outil pré-attentif performant pour la conscience mutuelle. Pour rappel, l'information avionique prime sur les perceptions naturelles des pilotes afin d'éviter les illusions sensorielles (cf. 2.2.4). Néanmoins avec l'analyse des comportements gestuels (cf. 2.3) il apparaît que le geste apporte à la « conscience mutuelle » des informations sur la « sensibilité » des pilotes. Cette compréhension de ces effets nous permet d'envisager conceptuellement la construction de nos propositions de designs (cf. chapitres 5 et 6). Enfin, nous avons présenté la sémiologie graphique, la Gestalt et les règles pour atteindre le concept de l'image avec ces mêmes designs, c'est-à-dire une représentation pré-attentive aux yeux des pilotes.

4 METHODE DE DESIGN

« La fonction est indispensable à tout objet, même le plus futile. Mais il faut bien comprendre que parfois, l'objet n'a pas la fonction que l'on croit ; par exemple, savoir lire [...] que mon presse-citron n'est pas fait pour presser des citrons mais pour amorcer une conversation » (cf. Figure 56).

(Philippe Starck 1997)



Figure 56. Presse citron par Philippe Starck, Alessi, 1987

Nous présentons dans ce chapitre la méthode générale employée nous ayant permis de proposer des conceptions de designs. Au même titre que le presseur à agrumes créé par le designer Philippe Starck, nous avons produit des designs pour alimenter et enrichir les discussions. Nous avons adopté un processus de design basé sur le principe d'atelier d'idéations. A chaque session, de nouveaux designs étaient présentés à des pilotes professionnels. Ils étaient invités à réagir librement sur le choix des variables graphiques, des dimensions ou encore de la pertinence du dispositif. Cette méthode de conception centrée sur l'utilisateur nous a permis d'établir une série de clés de compréhension sur l'importance de chaque dimension des gestes par rapport aux besoins des pilotes en matière de perception visuelle et de travail collaboratif (cf. chapitres 5 et 6).

Déroulé du chapitre

Dans ce chapitre nous présentons notre parcours créatif. Nous avons décidé de décomposer notre processus de design en trois étapes : création et idéation (cf. 4.1), prototypage des designs (cf. 4.2), évaluation avec les pilotes (cf. 4.3).

4.1 CREATION ET IDEATION

Dans ce sous-chapitre, nous décrivons notre parcours créatif pour arriver à la production d'objets graphiques représentant les dimensions gestuelles. Nous avons initialement prévu de travailler avec des dispositifs de réalité augmentée (*Hololens* et *UltraHaptics*) néanmoins pour des raisons que nous présenterons, nous avons favorisé l'affichage d'une interface graphique directement sur les écrans des pilotes.

4.1.1 Cartes de support à la conversation



Figure 57. Lecture de gauche à droite : Boeing 777X, *Pro Line fusion2* par Rockwell Collins, Comac 919, Dassault Falcon 5X, *EASy* et F35, *TR3* par Elbit Systems and Harris.

En juillet 2017, j'ai conçu avec un pilote d'aviation légère un jeu de 42 cartes de support à la conversation (cf. Figure 57). Le choix des sujets présentés par ces cartes est spécifique au domaine de l'aéronautique. Nous avons sélectionné des postes de pilotage d'aviation civil, commercial et militaire, des systèmes de visualisation synthétique (SVS), des projets d'interfaces tactiles (e.g. Avionics 2020, F35). En matière de format, chaque carte comporte une image du sujet et des caractérisations techniques (e.g. dénomination, date de lancement, sujet installé sur l'aéronef dénommé x, technologie tactile). Ces cartes ont été disposées sur la table pour chaque entretien avec des pilotes. En dehors de l'effet de curiosité, nous avons constaté qu'elles n'ont pas été utilisées par les pilotes sauf lors d'une séance (4 juillet 2018) où nous avons projeté les cartes sur un écran pour soutenir la discussion avec des exemples de postes de pilotage (cf. Figure 58).



Figure 58. Utilisation des cartes de support à la conversation lors d'une discussion avec pilote.

4.1.2 Phase préliminaire de croquis

Avant d'envisager *GestureView* comme une interface affichée sur les écrans tactiles, l'utilisation d'un casque à réalité augmentée fut envisagée. Compte tenu de la problématique et de la nécessité d'accentuer l'attention sur le geste de l'autre, nous avons pensé que présenter directement en vision centrale un retour continu d'informations enrichi sur le geste pourrait s'avérer une proposition intéressante en matière de suppléance. Le 19 octobre 2017, j'ai organisé à l'ENAC une séance d'idéation de type brainstorming pour trouver des idées dominantes sur le thème de la représentation des gestes. La séance s'est déroulée sur deux heures et a réuni 4 participants (scientifiques et designers). J'ai occupé le rôle de médiateur. Au début de la séance, j'ai présenté la problématique de recherche de ce travail sous forme de diaporama. A l'issue, les participants ont bénéficié de dix minutes pour inscrire librement sur des post-it des idées d'informations à représenter pour améliorer la compréhension du comportement gestuel entre les pilotes. Le choix de ces inscriptions était laissé libre (dessins, textes, données chiffrées, formes abstraites). Chaque participant était ensuite invité à présenter ses idées à l'ensemble du groupe. En tant que médiateur, j'ai par la suite organisé les post-it sur un tableau de la salle d'après leurs proximités idéologiques. Une deuxième étape d'idéation sur des post-it a été réalisée en réaction à la première afin de développer des idées d'intentions. En tant que médiateur, je n'ai pas participé aux étapes de fabrication de contenu hormis la présentation d'introduction de la séance. A l'issue de cette séance, j'ai représenté chaque idée par un croquis (cf. Figure 59).

Exemples d'idées :

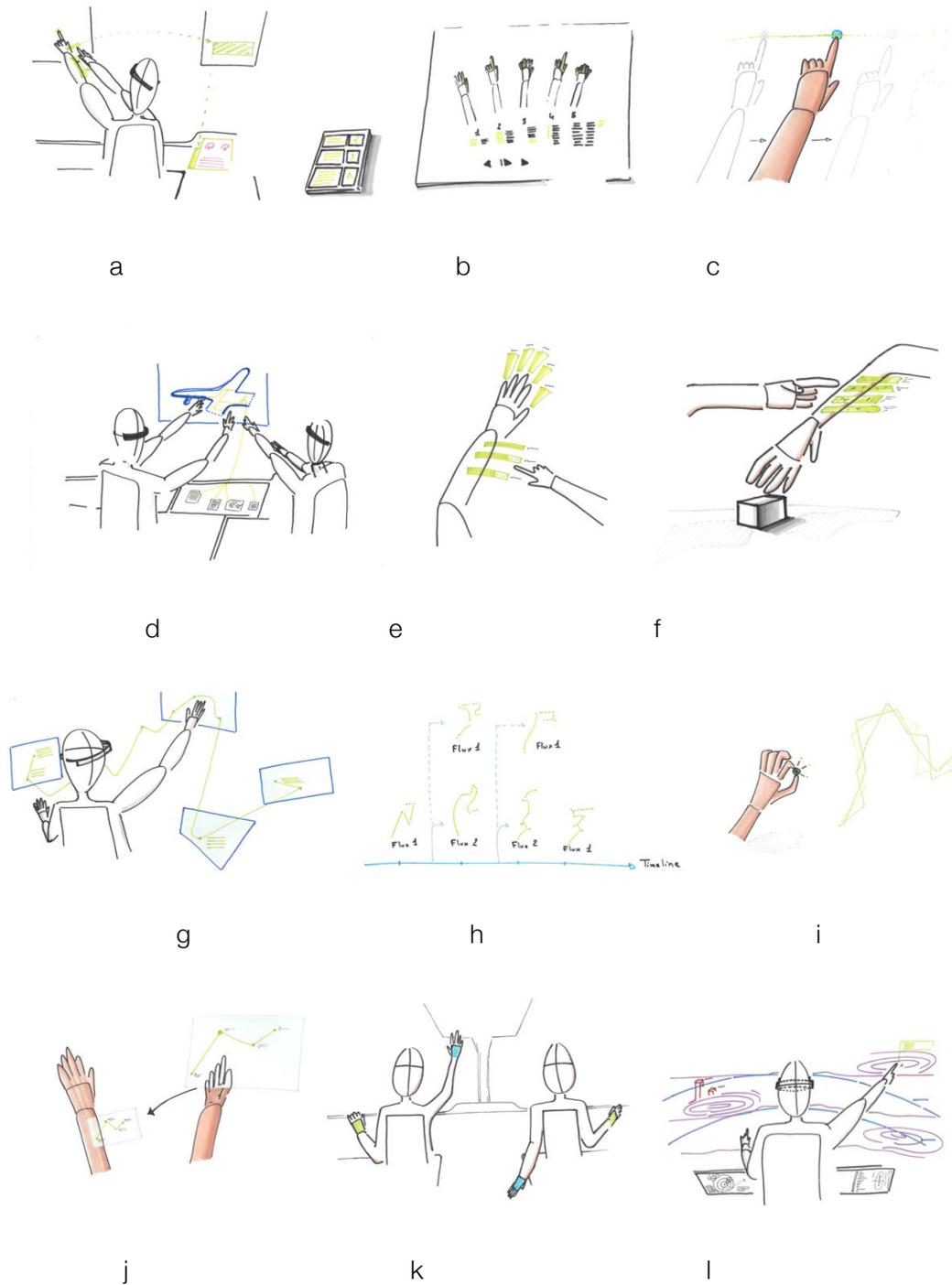


Figure 59. a) Interagir sur les systèmes avioniques directement sur son bras, b) Enregistrer ses flots gestuels dans une base de données, c) Avoir un retour d'information sur l'évolution temporelle du flot gestuel, d) Collaborer avec une représentation virtuelle, e) Utiliser son corps pour faire des réglages, f) Régler un contrôleur physique directement par son corps ou lui attribuer une fonction, g) Projeter les pages systèmes et être guidé pour naviguer en réalité augmentée. h) Visualiser la timeline des flots, i) Régler son rythme en fonction de sa fatigue, j) Afficher son rythme sur soi, k) Ressentir le geste de l'autre par un gant, l) Projeter la carte dans le poste de pilotage.

Ce travail d'idéation nous a apporté 19 idées à développer pour envisager une réponse à notre problématique. Nous avons décidé de développer la piste de la représentation des gestes par le concept de guidage. D'abord parce que, les pilotes sont familiarisés avec la notion de guidage par la représentation des trajectoires (cf. Figure 60). Ensuite, ce système de représentation s'adresse à la fois aux élèves pilotes dans un contexte de formation mais également aux pilotes professionnels. Enfin la représentation orientée par le guidage des gestes est basée sur la notion de spatialisation qui est bénéfique à la conscience de la situation (cf. 1.2.4).



Figure 60. Illustration donnée dans un manuel d'apprentissage pour deux flots procéduraux à réaliser par les deux pilotes après avoir démarré les moteurs.

4.1.3 Une piste de recherche abandonnée

A l'issue du précédent travail, nous avons sélectionné la piste de guidage des gestes. L'objectif était d'avoir un retour continu des agissements de l'autre dans le poste de pilotage. Dans un premier temps, nous avons envisagé de représenter les flots procéduraux pour le pilote qui doit les réaliser¹⁴. Pour ce faire, l'intention était de suppléer la vision réelle par un enrichissement d'informations virtuelles ou haptiques.

En raison d'une disponibilité de matériel, nous avons utilisé un casque de réalité augmentée *Hololens* de la marque Microsoft. Par rapport à des compétences acquises antérieurement, nous avons choisi le logiciel *autodesk 3ds Max* pour modéliser les représentations graphiques. Enfin, afin d'enrichir l'expérience gestuelle, nous avons imaginé l'ajout d'un dispositif à ultrasons pour émettre des informations sur le comportement de l'autre (cf.

¹⁴ L'ambition était que le pilote perçoive, à la fois ses propres gestes et ceux de son co-pilote.

Figure 61). Une fois encore, pour une raison de disponibilité, nous avons choisi le dispositif *UltraHaptics*. Le développement de ces informations a donné lieu à l'encadrement d'un stage de février à avril 2018 avec un étudiant de deuxième année ingénieur en informatique de l'ENAC dans le cadre d'un projet d'initiation à la recherche.

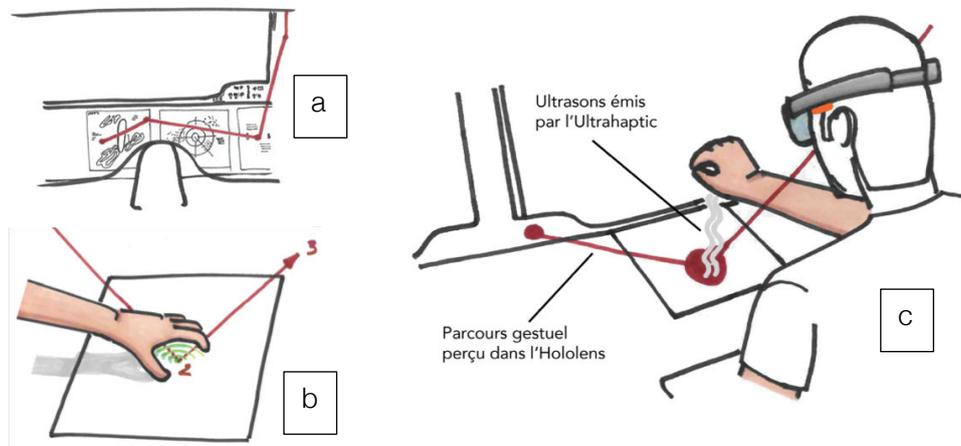


Figure 61. a) Ressentir une information et voir le flot procédural à réaliser ; b) Concept de vision du flot dans le casque ; c) Représentation globale du concept.

Malgré nos efforts en matière de développement, nous avons décidé d'interrompre cette proposition de solution pour plusieurs raisons. La première raison concerne la complexité technique de communication en continue entre la modélisation des objets graphiques, leurs affichages dans le casque de réalité augmentée et le dispositif d'émission d'ultrasons. En effet, le casque de RA de la marque *Hololens* produit par Microsoft a bloqué (pour une raison que nous ignorons) la communication avec le protocole de communication *Ivy* (utilisé dans les laboratoires de l'ENAC). En ce qui concerne *UltraHaptics* le dispositif a bloqué également la communication, mais cette fois à cause de la licence propriétaire. La deuxième raison concerne la perception même que l'on a en portant un casque. A l'inverse d'un casque en réalité virtuelle, le casque de RA présente une vision enrichie dans le cadre d'une fenêtre rectangulaire. Cela interrompt visuellement la continuité des lignes par les bords de cette fenêtre. La troisième raison concerne les limites des développements informatiques à cause de la licence propriétaire du dispositif *UltraHaptics*. Nous ne disposions pas d'une licence développeur pour des raisons économiques. Enfin, la dernière raison concerne la qualité des retours sensoriels provoqués par les ultrasons. Nous avons considéré qu'ils étaient trop faibles pour être envisageables dans un contexte de turbulence.

Ce concept a toutefois fait l'objet d'une présentation lors d'une séance d'entretien avec un pilote le 18 mars 2018 (cf. Figure 62). Nous avons réalisé une maquette vidéo basse fidélité pour proposer des variantes de représentation des gestes. La séance a été entièrement enregistrée (20min) et retranscrite (6p).

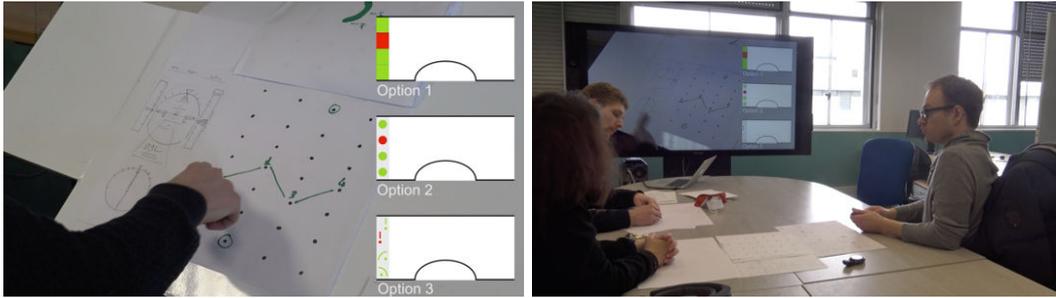


Figure 62. A gauche, maquettage basse fidélité par vidéo ; A droite, entretien avec un pilote professionnel.

Même si nous avons décidé d'interrompre cette piste de solution, l'entretien avec le pilote a confirmé l'intérêt d'avoir un système de représentation des gestes en vision centrale pour la suppléance. Sans évoquer les problèmes du tactile, le pilote a évoqué l'avantage de ce système par rapport aux postes de pilotage actuels, par exemple « lorsque il faut se tordre la tête pour aller regarder là-haut (vers l'OHP), et quand les deux regardent là-haut, ça veut dire que personne ne regarde devant » ou bien lors de situations impliquant de la « fumée » ou étant « trop bruyante », en somme, lorsque la communication par les moyens naturels entre les deux pilotes devient très difficile. Ce constat, en accord avec notre analyse de l'activité et des contraintes du tactile, nous a conduit à poursuivre notre travail de recherche sur les bénéfices offerts par un système de représentation des gestes qui présente, en face de chaque pilote, le comportement de l'autre.

4.1.4 Réorientation vers une nouvelle proposition de design : *GestureView*

Entre avril et mai 2018, j'ai réalisé plus de 200 croquis pour représenter les dimensions des gestes des pilotes et j'ai produit des storyboards (cf. Figure 63). Il y a deux phases de production de croquis : avant la phase d'évaluation avec les pilotes, puis pendant cette phase. Lors de la première phase de croquis, nous avons produit deux types de croquis. D'abord il y a des croquis de principe sans lien direct avec des scénarios procéduraux et opérationnels précis. Ils sont réalisés afin d'ouvrir au maximum nos libertés créatives. Ensuite, il y a des croquis associés à des storyboards, puis par extension à des scénarios procéduraux. Lors de la deuxième phase de croquis, nous avons approfondie nos croquis directement en lien avec la modélisation numérique. Nous présenterons quelques exemples de ces croquis plus en détail au chapitre 5 (cf. 5.2).



Figure 63. Vue globale des croquis.

Discussions et entretiens

Avant de définir nos prototypes à évaluer par les pilotes, nous avons discuté de nos croquis de représentations des dimensions avec des spécialistes de l'Interactions Humain-Machine, des designers, des philosophes, lors d'entretiens informels destiné à sélectionner les idées à développer pour l'étape suivante de prototypage. Nous avons organisé une séance (2h) le 24 mai 2018 avec 13 participants (scientifiques et designers spécialisés en Ingénierie des Systèmes ou en Interaction Humain-Machine). Pour faire comprendre la problématique de la représentation des gestes, nous avons organisé lors de cette séance deux ateliers d'élicitation durant lesquels les participants étaient invités à dessiner des gestes associés à la préparation d'une recette de cuisine et les gestes produits par le *marshaller*. Un *marshaller* est un agent travaillant au sol chargé de guider les pilotes des avions lorsqu'ils roulent sur les pistes. Nous avons choisi ces thèmes parce qu'ils ressemblent à des situations rencontrées dans le poste de pilotage. La recette de cuisine est une analogie à la réalisation d'un flot procédural (e.g. *checklist*, *memory items*) et les gestes du *marshaller* sont des gestes sémiotiques (e.g. « pas d'obstacle », « tourner à gauche », « tourner à droite », « ralentir », « arrêt d'urgence », « avancer tout droit »). Chaque atelier a duré dix minutes. En matière de matériel, des feuilles blanches 80g et des feuilles à carreaux (5 mm²) de format A4, des crayons de coloriage, des crayons de bois, des feutres à alcool, des stylos et des feutres à pointe fine (0,5 mm) étaient disponibles pour chaque participant. En tout, 72 dessins ont été produits (13 assemblages d'une multitude de croquis pour l'atelier 1, et 59 pour l'atelier 2)(cf. Figure 64). En matière de résultat, pour la recette de cuisine, il n'y a qu'un participant qui a représenté les étapes avec des dessins où la main apparaît, tous les autres participants ont décrit le geste directement par l'effet qu'il produit sur les aliments et les ustensiles de

cuisine. En ce qui concerne les gestes du *marshall*, la majorité des participants ont décrit les gestes par une représentation abstraite (croix, ligne), métaphorique (tortue pour signifier ralentir) ou textuelle. Aucun participant n'a dessiné de main.

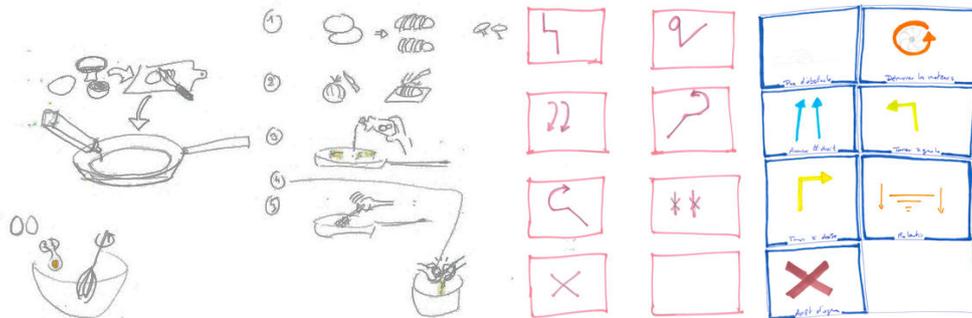


Figure 64. Exemples de croquis produits lors de l'atelier par les participants.

Ces séances nous ont permis d'améliorer notre parc de propositions graphiques pour représenter les dimensions gestuelles combinées aux informations avioniques des pilotes. Nous pensons que la faible représentation de la main dans la description gestuelle signifie qu'elle n'occupe pas une importance particulière pour la compréhension de la séquence d'items à réaliser, ni pour transmettre une information (cas *marshall*). Au regard de ce fait et en adéquation avec notre état de l'art sur les représentations utilisées pour afficher les gestes dans des situations à distances et co-localisés, nous avons favorisé lors du passage à l'étape suivante (c'est-à-dire le maquettage) des propositions de représentations basées sur l'abstraction et non pas morphologiques.

4.2 PROTOTYPAGE DES DESIGNS DE GESTUREVIEW

Pour produire un système de visualisation pré-attentive, nous avons fait le choix de regrouper nos variables visuelles dans un outil graphique que nous appellerons *GestureView* (GV). Son objectif est d'afficher le comportement gestuel de l'autre pilote sur l'interface avionique des systèmes de l'appareil. Nous présentons la démarche de maquettage (modélisation puis implémentation) pour produire les différentes propositions d'interface de *GestureView*.

4.2.1 Conception des représentations basées sur des scénarios de pilotage

Pour la première étape de notre travail (cf. chapitre 5) nous avons produit huit designs. Afin d'augmenter la quantité de propositions pour enrichir la discussion avec les pilotes, nous avons favorisé un stade de maquettage de faible niveau d'interaction (single touch) mais avec un haut niveau de fidélité visuelle, compte tenu de l'importance de la qualité représentationnelle requise pour évaluer la pré-attentivité de nos designs. De manière incrémentale, après chaque session de design, nous avons sélectionné les variables visuelles les plus pertinentes puis nous les avons modélisées sur *Adobe Illustrator CS6* en respectant des scénarios précis inspirés de notre analyse de l'activité. Chaque modélisation a ensuite

été extraite au format graphique vectoriel adaptable (*Scalable Vector Graphics* ou *SVG*) afin de pouvoir l'importer dans notre logiciel écrit en *Smala*.

Le design produit lors de la seconde étape (cf. chapitre 6) a impliqué un niveau plus avancé de maquettage (haut niveau d'interaction et haut niveau de fidélité visuelle).

4.2.2 Implémentation avec *Smala*, un langage réactif

Tous nos designs ont été conçus avec l'environnement de programmation *Djnn*, dédié aux applications interactives et développé par l'Équipe d'Informatique Interactive (EII) de l'ENAC. Cet environnement contient une librairie « *Djnn* » et un langage original « *Smala* » permettant de décrire de manière déclarative (d'après le paradigme réactif) la description du logiciel (e.g. mécanisme de contrôle, flot de donnée, gestion des entrées et des sorties, structuration en composants, affichage des *SVG*) d'après des évènements externes (e.g. timers, input par touch). *Djnn* fonctionne avec des mécanismes de traitement d'événements, de machine à état et de gestion de flots de données (Magnaudet et al. 2018).

4.3 ENVIRONNEMENT D'ÉVALUATION

Ces ateliers participatifs avec des pilotes professionnels - que nous décrivons plus en détail dans les chapitres correspondants (cf. chapitres 5 et 6) - permettent d'évaluer qualitativement nos représentations graphiques et la pertinence opérationnelle des dimensions des gestes pour la conscience mutuelle. Dans le cadre du projet *Airtius*, nous avons développé une plateforme modulable reproduisant un poste de pilotage afin de permettre une mise en situation écologique. Les évaluations ont été enregistrées et retranscrites pour faire jaillir des clés de compréhension (insights). Après chaque séance, nous avons pris en compte les retours d'expérience des pilotes pour proposer de nouvelles représentations afin d'enrichir la discussion autour de la représentation du geste et des informations avioniques.

4.3.1 Conception d'une plateforme modulable

Dans le cadre du projet *Airtius*, en adéquation avec mes compétences d'ébéniste, nous avons conçu en janvier 2017 une plateforme en bois (cf. Figure 65). Nous avons repris les codes architecturaux d'un poste de pilotage d'un avion commercial afin de créer un environnement écologique, c'est-à-dire proche de la réalité, pour immerger les pilotes dans leur situation de travail. Nous avons adopté une posture immersive parce qu'elle permet d'améliorer le retour d'expérience. De plus, cette reproduction du milieu leur permet une projection plus facile avec notre dispositif *GestureView* par rapport aux notions de spatialité des contrôleurs physiques, par rapport à la distance physique et visuelle avec l'autre pilote, enfin par rapport à l'environnement extérieur. La plateforme est composée de deux supports. Le premier permet de soutenir les dispositifs au sol (écrans en face et socle entre les pilotes). Il est en contre-plaqué d'Okoumé de 12 mm (pour la structure porteuse) et 10 mm (pour la structure esthétique). Le second permet l'accrochage des écrans incurvés LG 34UC79G© affichant l'environnement extérieur. Ils sont installés en face des pilotes et la suspension d'un

écran représentant le panneau de contrôle en tête haute est disposé au milieu du poste de pilotage. Hormis les écrans incurvés, tous les écrans Dell 2240T© sont tactiles et ils affichent les surfaces avioniques. Un joystick SPEEDLINK Dark Tornado© est présent en place droite de la plateforme. Il n'a pas été utilisé pour la première série d'évaluations avec les pilotes (cf. chapitre 5), mais uniquement pour la deuxième (cf. chapitre 6). Tous les composants de la plateforme sont déplaçables grâce à un système de rails Igus© et de fixation par serre-joints.

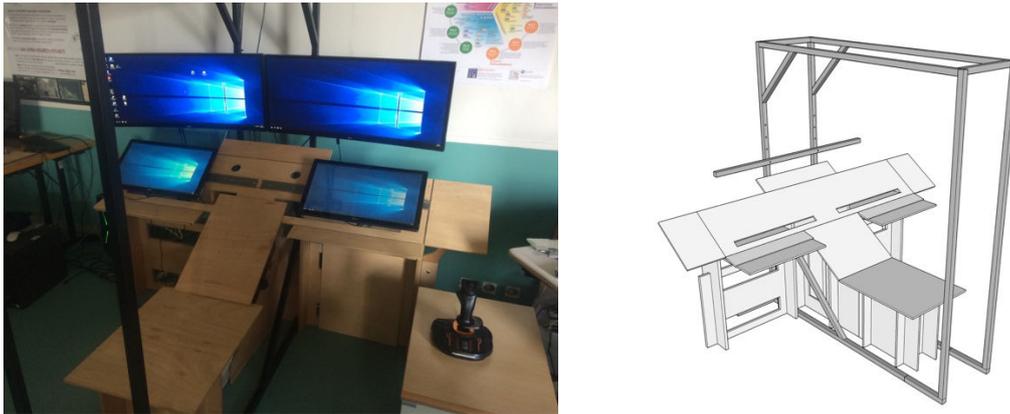


Figure 65. A gauche, vue de la plateforme en bois ; A droite, modélisation de la plateforme pour l'atelier de fabrication.

4.3.2 Transcriptions et production d'insights

Toutes les séances ont été enregistrées (16h) et partiellement retranscrites (139 pages). Comme pour l'analyse de l'activité, nous avons adopté la même démarche : à partir de retours d'expériences, nous avons produits des insights. Nous les avons rassemblés dans des catégories. A partir de ces éléments, nous avons amélioré des propositions graphiques ou nous avons proposé des éléments nouveaux (e.g. flou, animation) pour enrichir la discussion autour des dimensions gestuelles et des informations avioniques.

4.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les étapes de créations et d'idéations ayant participé à l'élaboration de notre réflexion. Nous avons abordé une tentative avortée de représentation éactive des gestes. Bien que prometteuse, les moyens dont nous disposions n'étaient pas suffisants pour envisager une solution pertinente (notamment à cause du faible retour tactilo-kinesthésique). Cependant, nous avons présenté ce travail puisqu'il nous a permis d'une part de confirmer l'intérêt pour les pilotes d'un outil de suppléance, grâce à un entretien avec un pilote professionnel, et d'autre de favoriser une représentation iconique basée sur la pré-attentivité. A partir de cela, nous avons produit des centaines de croquis pour signifier les dimensions des gestes. En parallèle, nous avons organisé un atelier d'idéation mené avec des experts en interaction humain-machine. Il leur avait été demandé de dessiner des gestes associés à la réalisation d'une recette de cuisine et à des signaux

propres à l'activité de *marshaller*. Cet atelier nous a permis de constater que les représentations des gestes excluaient presque totalement la représentation des mains. A partir de ce constat, au regard de la littérature spécialisée, nous avons envisagé une représentation iconique non morphologique. Enfin, nous avons présenté le cadre de nos designs et de leurs évaluations, d'abord en précisant la notion de maquettage avec une description des outils de développement utilisés (*Adobe Illustrator CS6, Smala*) puis la présentation de la plateforme modulable autour de laquelle nous avons organisé toutes les séances d'idéations et d'évaluations.

5 RECHERCHE PAR LE DESIGN : GESTUREVIEW

Ce chapitre présente un travail de conception participative mené avec des pilotes professionnels d'aviation commerciale au sujet d'un afficheur graphique, *GestureView*, dont le dessein est de présenter graphiquement des convergences d'informations relatives à la fois aux comportements gestuels des pilotes et à leurs liens fonctionnels avec les systèmes avioniques. Pour rappel, nous faisons l'hypothèse qu'apporter aux pilotes un outil de suppléance pour représenter les dimensions gestuelles permettra d'assurer un travail collaboratif performant en matière de conscience mutuelle dès lors qu'il y aura une interaction sur une surface tactile. En tout, nous avons conçu huit propositions de systèmes graphiques associés à plusieurs types de scénarios et à des dispositifs différents de contrôle avionique (*Overhead panel* et *Flight Control Unit*). Au cours de trois sessions, nous avons récolté des données qualitatives provenant d'avis d'experts pilotes sur la pertinence d'utiliser les dimensions gestuelles, la composition graphique et structurelle de chaque proposition graphique, ainsi que le choix des variables graphiques, enfin l'intérêt opérationnel du dispositif par rapport au travail collaboratif et à la problématique de l'interaction sur surface tactile. Au terme de notre étude, il apparaît d'abord que cette convergence des informations nous a conduit à dissocier la représentation des dimensions gestuelles d'après deux notions d'effets : le *résultat* exposant la conséquence de l'action directement sur l'afficheur et l'*impression* représentant la singularité du geste (e.g. hésitation, rythme). Ensuite, les pilotes ont déclaré utile la présence de *GestureView* parce qu'il permet de ne plus tourner la tête vers le centre de l'habitacle et d'interrompre visuellement le suivi d'une tâche en vision frontale (e.g. vers l'extérieur du poste de pilotage). Par ce fait, *GestureView* garantit l'ambition initiale de suppléance.

Déroulé du chapitre

Nous décrivons à présent cette étude. Nous présenterons d'abord le concept de *GestureView* (cf. 5.1). Nous poursuivrons avec, en écho chronologique avec le processus de conception, la phase de croquis et d'idéation sur la représentation graphique des dimensions gestuelles associées aux informations avioniques (cf. 5.2). Nous avons dessiné plus de 200 croquis dans l'intention de construire notre réflexion sur les dimensions gestuelles en accord avec notre connaissance de l'activité (cf. chapitre 2). Nous précisons que cette exploration a nourri notre travail réflexif de rédaction décrit dans cette thèse au sujet de la caractérisation des dimensions gestuelles (cf. chapitre 2). Le processus de croquis par accumulation est une méthode informelle de designer qui nous a permis d'identifier des variabilités de dimensions gestuelles possibles et des questions de représentation. Nous décrivons les principales questions et interrogations que nous avons explorées, organisées d'après les neuf dimensions que nous avons sélectionnées en accord avec notre travail réflexif. Après ce travail d'idéation préliminaire, nous présenterons nos designs en décrivant d'abord la méthode employée (cf. 5.3) avec le déroulé des séances (cf. 5.3.1), la présentation du dispositif relatif à chaque session (cf. 5.3.2) et les scénarios employés (cf. 5.3.3). Ensuite, nous décrivons chaque design d'après l'ordre chronologique de présentation aux pilotes : d'abord la session 1 avec les deux premiers designs (cf. 5.4), puis la seconde session avec deux nouveaux designs conçus en réponse aux remarques apportées lors de la première session (cf. 5.5), enfin la troisième session avec quatre

nouvelles propositions de designs sur un dispositif nouveau (FCU) afin d'enrichir les discussions en abordant de nouvelles variables graphiques (cf. 5.6). A l'issue de ces présentations, nous exposons les résultats qualitatifs des sessions organisées autour de notions propres à la représentation du comportement gestuel (e.g. spatialisation, temporalité, matérialité) bénéfique à la conscience mutuelle (cf. 5.7).

Ce travail a fait l'objet d'une publication scientifique (Becquet et al. 2019).

Valentin Becquet, Catherine Letondal, Jean-Luc Vinot, Sylvain Pauchet. How do Gestures Matter for Mutual Awareness in Cockpits? Disclosing Interactions through Graphical Representations. In *DIS'19 Designing Interactive Systems 2019, Jun 2019, San Diego, United States*. <https://doi.org/10.1145/3322276.3322306>

5.1 CONCEPT DE GESTUREVIEW

Compte tenu de la perte de l'attention visuelle, des limites des gestes tactiles réalisables et de la difficulté accrue à comprendre les actions de l'autre pilote, nous proposons une approche basée sur des représentations graphiques fournissant un outil de suppléance afin d'afficher les informations gestuelles nécessaire à la performance d'une conscience mutuelle. Nous nommons cet outil « *GestureView* ». Le principe de fonctionnement est le suivant. Chaque pilote possède devant lui un écran tactile. Le pilote assis à gauche, occupe le rôle de Pilot Monitoring (PM). Son écran tactile affiche une interface représentant un panneau de contrôle des systèmes avioniques sur lequel il lui sera demandé d'agir. Le pilote assis à sa droite, occupe le rôle de Pilot Flying (PF). Il possède en face de lui une interface composée de trois instruments, le Primary Flight Display (PFD), le Navigation Display (ND) et notre outil le *GestureView*. Cet outil affiche des représentations graphiques des dimensions des gestes numériques réalisés par le PM sur son interface de contrôle des systèmes avioniques. Pour évaluer auprès des pilotes professionnels l'intérêt de chaque dimension (cf. 3.4), nous proposerons différentes constructions graphiques pour le *GestureView* (designs cf. 5.4).

5.2 PRESENTATION DES CROQUIS

Dans notre manuscrit, nous avons défini les dimensions gestuelles en nous basant sur plusieurs écrits de littérature spécialisée (IHM, SHS) et sur notre analyse de l'activité gestuelle des pilotes (cf. chapitre 2.3). Néanmoins, en amont de ce travail réflexif, nous avons utilisé une méthode informelle de production d'idées et de questionnements couramment pratiquée par les designers. Nous avons dessiné plus de deux cents croquis pour exprimer des idées, des intentions ou bien des déclinaisons formelles¹⁵. Nous

¹⁵ L'usage des termes « déclinaison formelle » est une expression courante dans le langage de designer. Elle correspond à la production variée d'objets graphiques, pensée pour enrichir un

présentons ci-après une synthèse de ce travail. Elle est organisée en accord avec notre système réflexif de caractérisation des dimensions des gestes à représenter (localisation, temporalité, mouvement, intention, statut, identification, trace, complétude, rôle).

5.2.1 Localisation

Pour rappel, la localisation d'un geste sur une surface tactile correspond à son positionnement dans l'espace selon les axes cartésiens x et y (et z si prise en compte de la pression ou avec le couplage d'un dispositif de capture visuelle). J'ai imaginé plusieurs propositions de représentation. En premier lieu, nous avons exploré des idées relatives à l'aspect mimétique de la réalité, c'est-à-dire, en reproduisant à l'identique la disposition des surfaces avioniques du poste de pilotage (cf. Figure 68). La représentation de la position du geste correspond à son point de contact réel avec l'une des surfaces sans déformation (hormis en ce qui concerne la notion d'échelle pour des raisons évidentes de dimensionnement d'affichage). En développant le niveau de précision, la localisation peut indiquer la position exacte du ou des doigts sur la surface (cf. Figure 67). Nous nous sommes inspirés de cette intention dans la conception de la première proposition de design soumise aux pilotes (D1). J'ai également essayé d'autres pistes comme celle de l'abstraction totale avec la construction d'une matrice (cf. Figure 66). Chaque fonction occupe un emplacement de taille identique sur une matrice en damier de forme carrée. La position du geste passe d'abord par l'identification de la fonction plus que par sa localité réelle dans l'espace. Le choix du damier permet d'optimiser dans l'affichage la quantité de fonctions, en

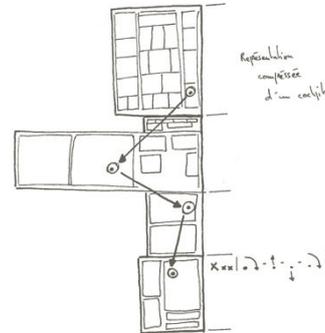


Figure 68. Représentation mimétique de la surface de l'autre.

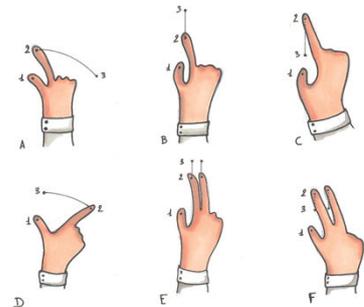


Figure 67. Représentation de la position exacte du point de contact.

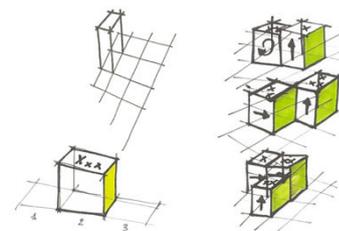


Figure 66. Proposition de représentation par l'abstraction.

dessin originel. Par exemple, le dessin d'une courbe d'un vase peut impliquer une quantité importante de déclinaisons formelles pour arriver à la courbure désirée.

accord avec les limites de perception de l'œil humain.

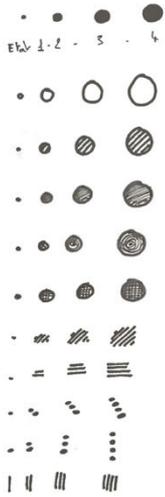


Figure 71. Exploration de la variable de grain.

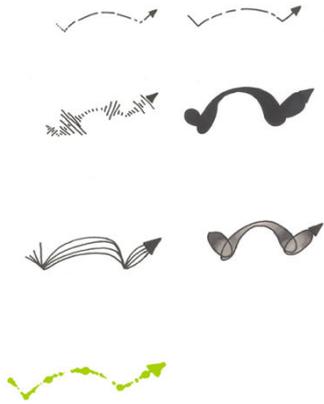


Figure 72. Exploration esthétique.

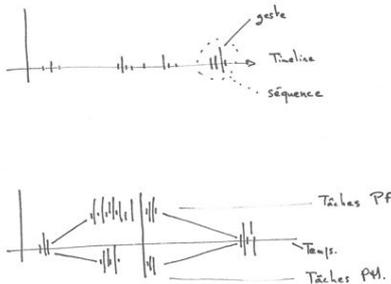


Figure 70. Idée d'une timeline pour l'équipage.

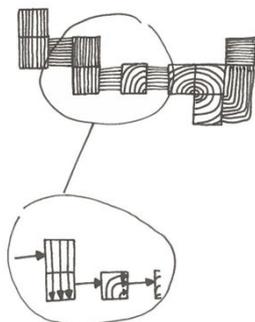


Figure 69. Associer le mouvement à la temporalité.

5.2.2 Temporalité

La temporalité regroupe les notions de marqueurs temporels à la fois sur le plan atomique, le geste isolé, mais également par rapport à un ensemble de gestes, la séquence gestuelle. L'une des premières idées fut d'utiliser la variable de grain de Bertin du fait de sa performance en qualité de lecture ordonnée (cf. 3.4.2). L'œil distingue l'ordre d'évolution grâce à la convergence de l'épaisseur des traits et des zones vides. Le dessin nous a permis d'explorer la question suivante : comment faire ressentir le rythme des pilotes ? J'ai proposé plusieurs pistes, par exemple la variation de taille correspondant à la durée de l'interaction (cf. Figure 71) ou bien des propositions esthétiques comme le doublement des traits, le hachurage, la variation dégradée de valeurs (cf. Figure 72). En écho à la notion de rythme, l'objectif pour les pilotes est la coordination des actions. J'ai proposé par exemple de représenter une timeline regroupant les actions des deux pilotes (e.g. Figure 70). Nous développerons ce principe avec le design 2 (D2). Enfin, la représentation de la dimension de temporalité peut être envisagée de pair avec la trajectoire du geste (e.g. Figure 69). Nous présentons ici une proposition de représentation d'une séquence gestuelle en tant qu'image esthétique se construisant en fonction des trajectoires employées par les gestes. Il y a deux types de cases, avec et sans contours. Les cases avec contours représentent les actions produites sur le système avionique. Les autres permettent d'informer sur la direction empruntée entre chaque action par les gestes. On distingue ici les gestes d'action et les gestes de déplacement pour accéder aux gestes d'actions. Le grain représente la trajectoire des gestes.

5.2.3 Mouvement

Le mouvement correspond au déplacement de la dimension de position par rapport à la dimension de temporalité. J'ai imaginé plusieurs possibilités de représentation pour représenter les variations de mouvement. En effet, le mouvement peut être par exemple : lent, rapide, continu, avec des interruptions ponctuelles, hésitant. Notre analyse de l'activité montre que les pilotes sont sensibles à la qualité des mouvements des autres pilotes. La flèche est l'objet graphique communément compris par les utilisateurs pour indiquer le déplacement entre deux points (Belaën 2005). De fait, j'ai rapidement exploré la piste de la variation des traits tracés par la flèche pour indiquer les nuances comportementales du geste (cf. Figure 74). J'ai proposé l'idée d'utiliser soit la variation de couleurs, soit la variation de valeurs pour décomposer la flèche afin d'accentuer les temps du mouvement. Par exemple : le mouvement d'approche et le mouvement de contact (cf. Figure 73). J'ai également exploré la possibilité de représenter le mouvement du geste directement par l'effet qu'il produit sur la fonction, en accord avec la représentation de la localisation directement associée à la fonction présentée précédemment (voir Localisation 6.2.1), le mouvement du geste se traduit par le déplacement de la fonction sur la matrice en damier (cf. Figure 75).

5.2.4 Statut

La dimension du statut représente l'état d'accomplissement du geste par rapport à une action sur une fonction avionique. En d'autres termes, il s'agit d'avoir un retour d'information sur la performance du geste sur le système. Nous pouvons traduire cette définition par deux questions. Est-ce que le geste a bien été identifié par le système ? Est-ce qu'il a correctement engagé la fonction désirée ? Compte tenu du rapport direct entretenu par le geste avec

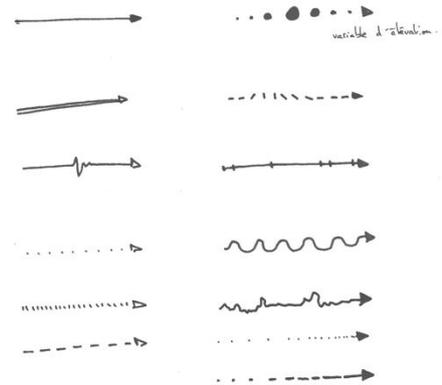


Figure 74. Exploration graphique pour la représentation des flèches.

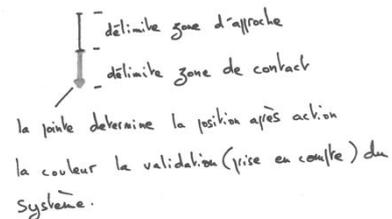


Figure 73. Dissocier deux instants par la représentation.

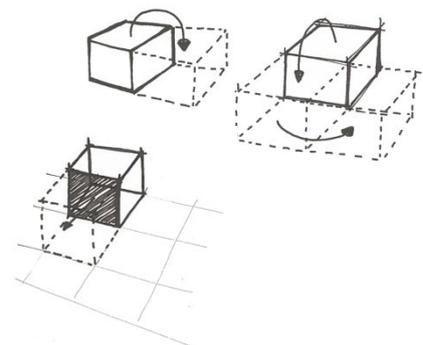


Figure 75. Représentation du mouvement du geste par le déplacement d'un objet cubique.

les fonctions avioniques, nous avons exploré principalement la piste de représentation associant directement la dimension du statut et la dimension de l'identification, afin d'envisager la pré-attention (pour centraliser les informations donc éviter d'avoir deux informations à deux endroits différents sur l'écran). Pour rappel, nous avons déterminé la dimension d'identification comme le rapport (à l'objet ou à la fonction) manipulé par le geste (voir Identification 5.2.5). Nous exposons deux exemples issus de cette réflexion. Le premier exemple (cf. Figure 76) représente une fonction à deux états. Le statut du geste est indiqué par le remplissage d'une zone (côté supérieur ou côté inférieur) avec une variable de couleur : verte pour signifier activer et rouge pour signifier son contraire. En complément de la dimension temporelle, j'ai proposé l'utilisation de la notion de remplissage pour combiner les dimensions (cf. Figure 77). Le deuxième exemple (cf. Figure 78) représente les fonctions d'après quatre états (il manque l'inscription de l'état « panne » sur le croquis) : Validé, cross-check, non validé, panne. En fonction du statut du geste, l'état de la fonction évalue en modifiant la ligne par la couleur correspondante (vert, rouge, noir et orange pour la panne). J'ai favorisé la variabilité de la couleur parce qu'elle est culturellement évocatrice d'état (e.g. feu tricolore) et déjà utilisée pour renseigner les états des fonctions avioniques dans le domaine aéronautique avec l'ARINC661 (cf. 1.4.1).

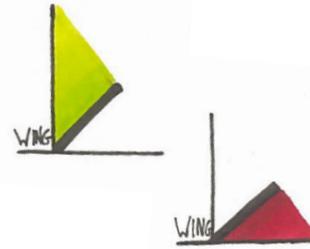


Figure 76. Représentation d'une fonction à deux états.

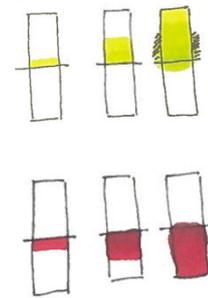


Figure 77. Animation de remplissage.

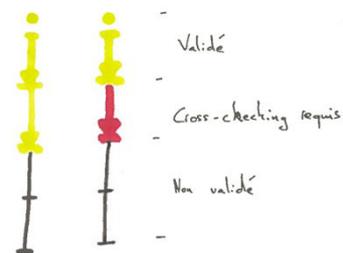


Figure 78. Représenter la fonction avec quatre états.

5.2.5 Identification

La dimension de l'identification comporte deux informations relatives à la fonction engagée par le geste : d'une part l'identification de la fonction avionique et d'autre part son état à un instant t. Attention, le terme état diffère de l'état du geste (dimension du statut), ici l'état correspond à une information sur la fonction avionique (e.g. état de démarrage des moteurs, phares allumés). Ce travail d'exploration nous a permis de nous poser les questions suivantes : Les pilotes ont-ils besoin

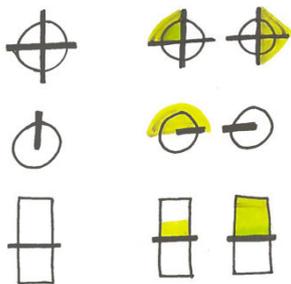


Figure 79. Représentations des fonctions en 2D par une analogie aux formes des contrôleurs physiques.

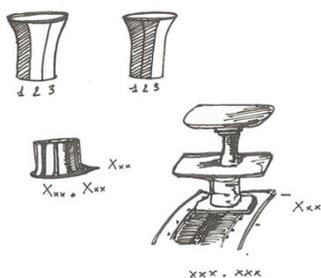


Figure 80. Représentations des fonctions en 3D par une analogie aux formes des contrôleurs physiques.

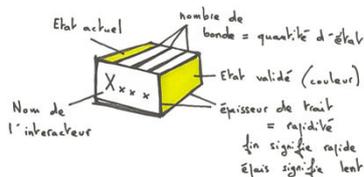


Figure 81. Exploration d'une représentation par l'abstraction.

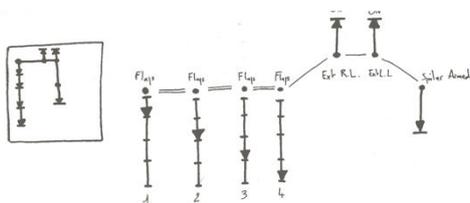


Figure 82. Représentation d'un flot procédural.

d'identifier chaque fonction ? Est-ce que l'on peut représenter les fonctions par le nombre d'états dont elles disposent ? Les pilotes peuvent-ils uniquement comprendre une fonction par le geste engagé sur celle-ci ? Comment discriminer chaque fonction ? Nous avons d'abord proposé des représentations basées sur l'évocation de la forme physique avec une variation dans la qualité archétypale, de la simple jauge en 2D (cf. Figure 79) à la représentation d'un contrôleur physique complexe (cf. Figure 80). Ces représentations ont en commun d'exposer, par analogie avec la réalité, la quantité d'états. Compte tenu de la très grande quantité de fonctions, nous avons également dessiné des propositions dont l'ambition est d'être standardisable. Par exemple, la Figure 81 montre un objet graphique comportant trois faces (cf. Figure 81). Sur chacune de ses faces, il est affiché des informations propres à des dimensions du gestes. L'identité de la fonction apparaît textuellement, la quantité d'état est symbolisée par une quantité concordante de bande noire et l'état courant (la dimension du statut) est représenté par un remplissage complet de la zone correspondante à l'état. Bien que nous n'ayons pas gardé cette représentation pour nos designs, nous avons conservé cette notion de standardisation parce qu'elle nous permet d'afficher toutes les fonctions sans complexifier la quantité d'objets graphiques à afficher à l'écran. Enfin, nous avons exploré la représentation de la fonction par le mouvement du geste du pilote. Dans l'exemple ci-contre (cf. Figure 82) le pilote réalise un flot procédural en phase d'approche (il sort les volets des ailes dit *flaps*, allume les phares extérieurs et déclenche les destructeurs de portance dit *spoilers*). La dimension du mouvement est associée à la dimension de l'identification. Le problème majeur de cette piste de représentation était la synthèse de la séquence gestuelle pour avoir une vue pré-attentive de la situation. Nous avons associé cette exploration à l'exploration de la dimension de la trace.

5.2.6 Trace

Pour rappel, la dimension de la trace représente l'ensemble de la séquence gestuelle. Cet outil dont la fonction est d'être une mémoire externalisée permet d'avoir un historique accessible librement dans le temps et de permettre aux pilotes d'évaluer la dimension de la complétude des gestes. L'enjeu de recherche graphique était d'afficher une trace synthétique pour regrouper visuellement l'ensemble d'une séquence gestuelle. Pour ce faire, en nous inspirant des propositions d'assemblages des déplacements présentées dans la Sémiologie Graphique (cf. Figure 84) nous avons développé une lecture en deux temps : d'abord, par décomposition puis par synthèse. Les deux exemples (cf. Figure 83) illustrent ce propos. Ils sont respectivement composés de quatre et sept gestes. A droite, il y a la vue en détail de chaque mouvement des gestes réalisés sur une fonction avionique (nous avons imaginés des gestes rotatifs et translatifs analogiques à ceux réalisés sur des contrôleurs physiques afin d'avoir une vision plus significatrice). A gauche, il y a un regroupement par effet d'accumulation de l'ensemble des gestes de la partie droite. La disposition de ces éléments graphiques est déterminée par la position des fonctions sur l'interface. Cette piste de représentation nous a inspiré pour la conception du premier design (D1).

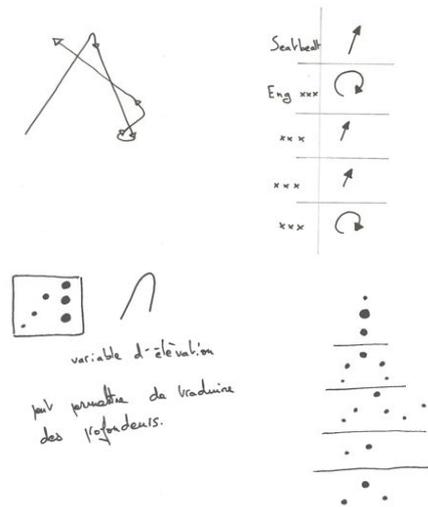


Figure 84. Deux propositions de représentation des déplacements inspirés des propositions de Jacques Bertin.

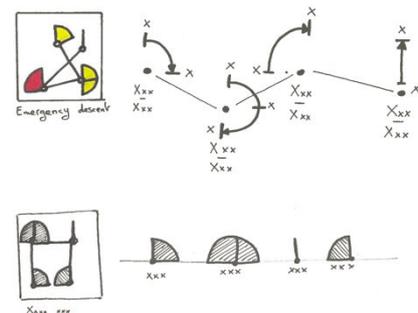


Figure 83. Représentations en deux temps d'un flot procédural, à gauche une vue synthétique de l'ensemble et à droite chaque geste apparaît indépendamment.

5.2.7 Complétude, Rôle et Intention

Lors de la phase de croquis nous n'avons pas proposé d'idées graphiques par rapport aux dimensions de complétude, de rôle et d'intention. Pour rappel, la dimension de la complétude concerne, à l'inverse du statut, le contrôle de l'aboutissement d'une action lorsqu'elle est isolée et plus largement d'une séquence gestuelle par rapport à un flot procédural ou une checklist. La dimension du rôle désigne le métier pratiqué par le pilote. La dimension de l'intention représente le caractère partageable du geste (e.g. cross-check).

5.3 METHODE

Le projet *GestureView* 1 s'étend d'avril 2018 à janvier 2019. Il se compose de quatre temps forts : la phase d'idéation (6.2), la session 1 (6.4) avec la production de deux designs (D1, D2), la session 2 (6.5) avec la production de deux nouveaux designs (D3, D4), enfin la session 3 (6.6) avec la production de quatre nouveaux designs (D5, D6, D7, D8). Les deux premières sessions proposent aux pilotes d'agir sur un écran tactile représentant un panneau de contrôle des systèmes avioniques similaire à l'*Overhead panel* (déjà présent dans les postes de pilotage actuels). La troisième session permet d'évaluer des représentations d'interactions sur le panneau de contrôle du pilotage automatique (similaire à l'actuel *Flight Control Unit* ou FCU chez Airbus).

5.3.1 Walkthrough

Pour évaluer qualitativement nos propositions de conception, nous avons fait appel à des pilotes professionnels. L'organisation des séances est relative à chaque session (cf. Figure 85). Pour la session 1, assis autour d'une table de réunion, les pilotes ont d'abord visionné une présentation décrivant la problématique de notre travail basée sur l'étude de l'activité (cf. chapitre 1). Chaque pilote était invité à réagir durant la présentation afin d'exprimer son ressenti par rapport à la conscience mutuelle et à la perception de l'autre. A l'issue, le pilote était invité à s'asseoir sur le siège droit de la plateforme afin d'avoir en face de lui *GestureView*. Aux sessions 2 et 3 les pilotes étaient invités à s'installer directement sur la plateforme. Une fois installés, nous présentions aux pilotes les designs en décrivant les interactions et les corrélations visuelles sur *GestureView*. Ils étaient invités à réagir. En retour, nous posions des questions en réaction à leurs commentaires pour enrichir la discussion autour des variables graphiques, des dimensions des gestes et sur la disposition des éléments. Les séances ont été enregistrées (10h24) et partiellement retranscrites (51 pages).

Date	Durée (h.min)	Type de séance	Profil du/des pilote(s) Nombre de pilotes avec dénomination [x]; Grade; Compagnie; Qualification(s)
18/06/2018	1.12	Session 1 (D1 & D2)	1: [VD]; Pilot-in-Command; Transavia; B737
21/06/2018	1.14	Session 1 (D1 & D2)	2: [LSB]*; Ø; Ø; A320 & [SF]; First Officer; Twin Jet; Beechcraft 1900D
26/06/2018	1.16	Session 1 (D1 & D2)	1: [LJ]; First Officer; Volotea; A320
04/07/2018	1.07	Session 1 (D1 & D2)	1: [OL]; First Officer; Air France; A320 et B737
30/08/2018	1.07	Session 2 (D3 & D4)	1: [VD]; Pilot-in-Command; Transavia; B737
31/08/2018	1.27	Session 2 (D3 & D4)	2: [LSB]*; Ø; Ø; A320 & [SF]; First Officer; Twin Jet; Beechcraft 1900D

Date	Durée (h.min)	Type de séance	Profil du/des pilote(s) Nombre de pilotes avec dénomination [x]; Grade; Compagnie; Qualification(s)
31/08/2018	0.51	Session 2 (D3 & D4)	1: [OL]; First Officer; Air France; A320 et B737
07/09/2018	0.54	Session 2 (D3 & D4)	1: [LJ]; First Officer; Volotea; A320
04/12/2018	1.05	Session 3 (D5, D6, D7 & D8)	2: [LSB]*; Ø; Ø; A320 & [SF]; First Officer; Twin Jet; Beechcraft 1900D
10/12/2018	0.11**	Session 3 (D5, D6, D7 & D8)	1: [LJ]; First Officer; Volotea; A320
SOMME	10.24	* Pilote sans emploi lors de la séance ; ** Problème de camera durant la séance (présence d'enregistrement audio uniquement en fin de séance).	

Figure 85. Chronologie des ateliers de conceptions participatives regroupées par sessions de designs.

5.3.2 Plateforme

Les propositions de représentations graphiques ont été présentées aux pilotes par le biais des écrans tactiles supportés par la plateforme présentée précédemment (5.4.1). Nous décrivons ci-dessous, la structure du dispositif et l'architecture logicielle pour chaque session.

Structure du dispositif pour les sessions 1 & 2

Le système est composé de deux écrans tactiles avec un affichage relatif aux besoins des métiers de pilotage : Pilot Flying (PF) et Pilot Monitoring (PM). Communément aux deux métiers, l'affichage comprend un *Primary Flight Display* (PFD) et un *Navigation Display* (ND) d'une taille d'encombrement proportionnelle aux capacités d'affichage de l'ensemble des fenêtres. Sur l'écran du PM ces deux instruments avioniques sont placés à la gauche d'un panneau de contrôle de type panneau de contrôle positionné en position centrale tête haute (*Overhead panel* ou OHP). Nous avons conçu une proposition d'OHP en accord avec notre travail de représentation gestuelle. Il affiche les principaux systèmes avioniques (Engine, Fuel, APU, Hydraulic, Air Bleed, Electrical)(cf. Figure 86) et des systèmes subsidiaires pour la première version (lights, communication, map)(cf. Figure 87).

Panneau de contrôle des systèmes avioniques pour la session 1

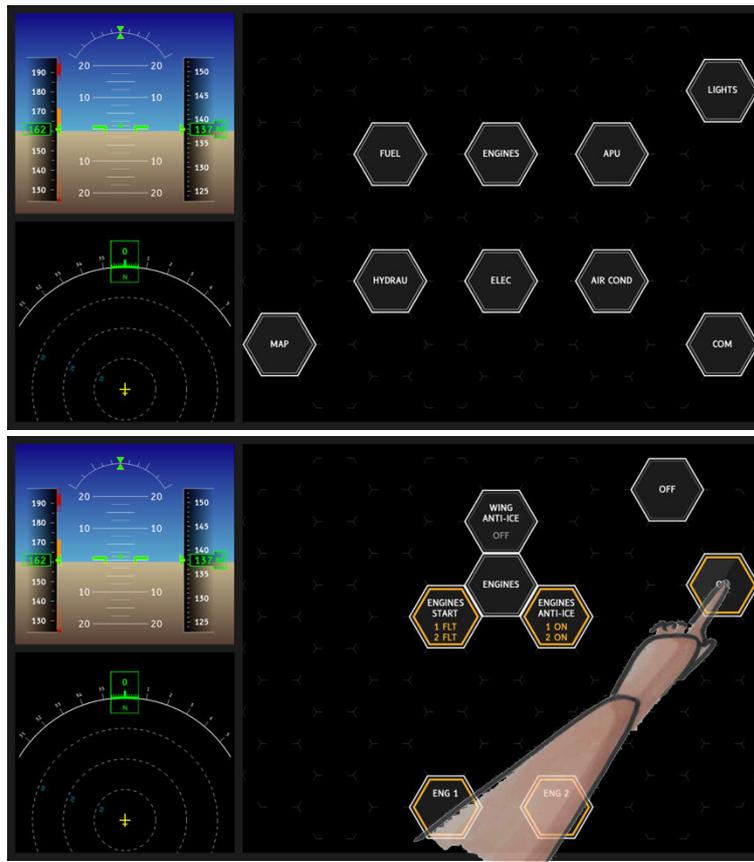


Figure 86. *Overhead panel* présenté pour la première session. En haut, affichage du menu principal montrant les six principaux systèmes avioniques ainsi que trois systèmes subsidiaires (Lights, Com., Map). En bas, exemple d'affichage de l'interface en cours de fonctionnement.

Panneau de contrôle des systèmes avioniques pour la session 2

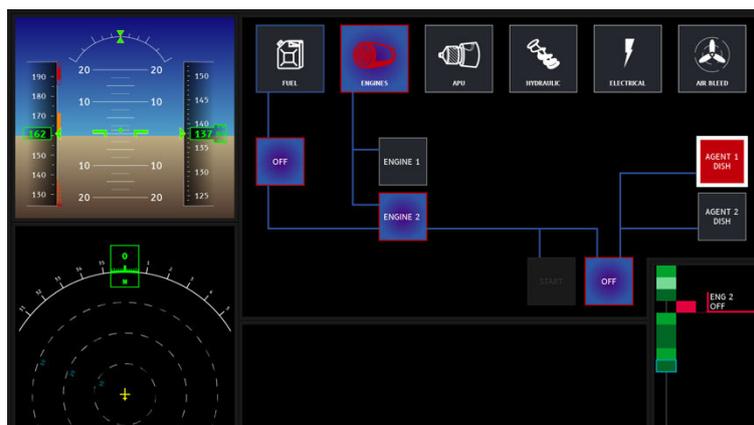


Figure 87. *Overhead panel* présenté pour la deuxième session. Exemple d'affichage de l'interface en cours de fonctionnement. Les six systèmes avioniques sont disposées en haut de l'interface, les fonctions apparaissent en dessous et sont connectées par des réseaux.

Structure du dispositif pour la session 3

L'interface de gauche est remplacée par un panneau de contrôle du pilotage automatique (*Flight Control Unit*) représentant uniquement les quatre principales fonctions de contrôle (*Speed, Heading, Altitude, Vertical Speed*). Cette interface a été développée par le projet Airtius. Pour modifier la valeur d'une fonction, par exemple l'altitude (cf. Figure 88), il faut appuyer sur le rectangle de la fonction correspondante puis effectuer un glissement sans relâcher vers le bas (ou le haut pour le mettre en gestion automatique) puis un glissement vers la gauche pour diminuer ou la droite pour augmenter la valeur. A l'inverse du précédent, ce glissement supporte le relâcher.

Panneau de contrôle du pilotage automatique pour la session 3

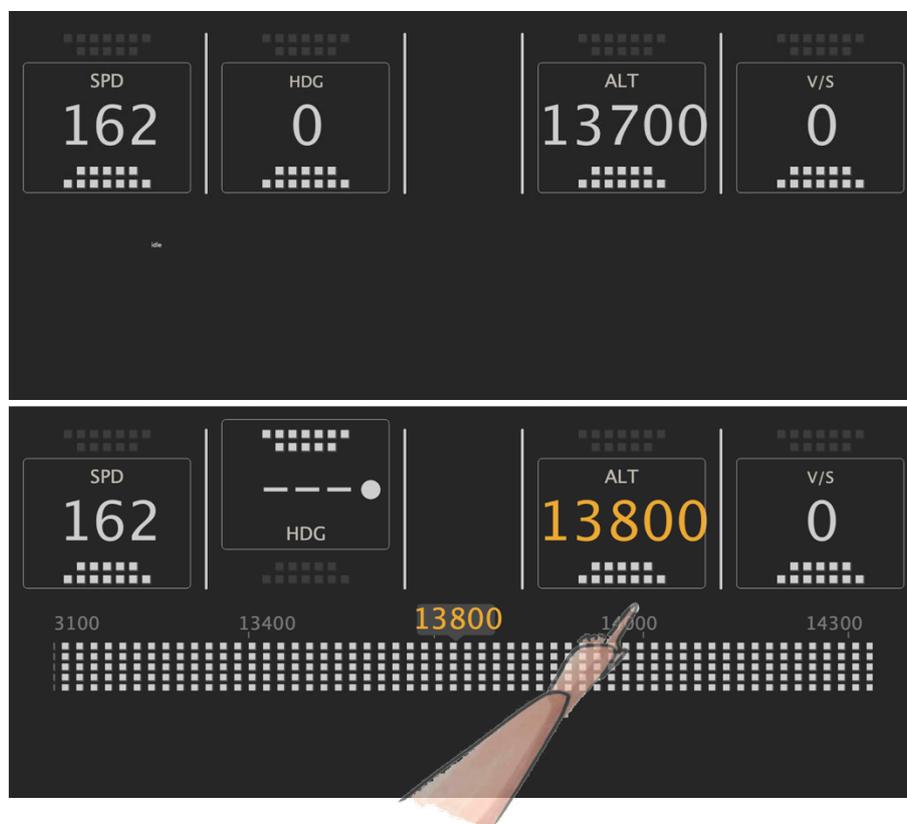


Figure 88. *Flight Control Unit* présenté pour la troisième session. Les quatre fonctions sont disposées en haut de l'interface. En haut, affichage de l'interface sans interaction. En bas, affichage de l'interface en cours de fonctionnement.

Architecture logicielle

L'application principale est composée de deux fenêtres Monitor PM et Monitor PF (qui accueille *GestureView*). Elle est développée en langage réactif Smala et utilise la librairie de programmation *Djnn* (cf. Méthode 5.3.2). La réalisation graphique des interfaces est réalisée sur *Adobe Illustrator CS6* puis converti au format de graphiques vectoriels évolutifs

(SVG) pour être interprétable et dynamique avec Smala. L'application est hébergée sur une machine Linux.

5.3.3 Scénarios

Trois scénarios ont été conçus (cf. Figure 89). Le scénario (S1) Engines Start Switches Anti Ice correspond à un flot procédural permettant le contrôle du dégivrage des moteurs. Le pilot monitoring (PM) sélectionne dans cet ordre : Engine ; Engine start ; ENG 1 ; ENG 2 ; CONT burner mode ; Engine Anti Ice ; ENG 1 ; ENG 2 ; ON ; Engine. Ce flot est réalisable sans contrainte particulière de stress ou de coordination contrairement au second scénario. Engine failure after V1 procedure (S2) est un « memory items » (séquence d'actions mémorisées) qui est réalisé en réponse immédiate lorsqu'une anomalie est détectée sur un moteur pendant la phase de décollage. Il est impératif que cette situation fasse l'objet d'un haut niveau de conscience mutuelle. Le problème se produit en bout de piste et oblige les pilotes à poursuivre leur vol jusqu'à ce qu'ils atteignent une altitude de sécurité (400 pieds). Dans notre scénario, le moteur 2 s'arrête de fonctionner : après avoir vu le problème et décidé de décoller, une fois les 400 pieds atteints, le PF est toujours incapable de stabiliser l'avion, il garde le cap, main sur le manche et demande au PM de faire le memory items : Engine ; Eng 2 ; OFF ; Full OFF ; Agent 1 Dish. L'avion se stabilise et le scénario se termine. Enfin, le troisième (S3) est exécuté sur l'interface de commandes du pilotage automatique (FCU). Le PF effectue trois gestes de réglage dans l'ordre suivant : augmentation de la vitesse ; réglage du cap ; augmentation de l'altitude.

Interface	Scenario	Design	Type de geste
<i>Overhead panel</i> (OP)	Engines Start Switches Anti Ice (S1)	Honeycomb (D1)	Procedural flow (normal situation)
		Timeline (D2)	
	Engine failure after V1 (S2)	Bricks (D3)	Memory items (critical situation)
		Onion (D4)	
<i>Flight Control Unit</i> (FCU)	Speed, Heading, Altitude setting (S3)	Finger Shadow (D5)	Atomic gesture (normal & critical situation)
		Button Shadow (D6)	
		Blurring (D7)	
		Rim Texture (D8)	

Figure 89. Les scénarios utilisés pour chaque design.

5.4 PRESENTATION DES DESIGNS

Nous présentons ici nos huit designs exposés aux pilotes durant des ateliers de conception participative. Nous présentons d'abord deux designs (D1, D2) issus du travail de réflexion engagé lors de l'étape d'idéation par les croquis présentés précédemment (cf. 5.2), puis deux designs (D3, D4) inspirés des remarques produites lors de la première session d'ateliers, et enfin quatre designs (D5, D6, D7, D8) proposés pour enrichir la

discussion sur l'intérêt opérationnel d'utiliser les dimensions gestuelles pour suppléer aux interactions tactiles.

5.4.1 Design 1 : Honeycomb

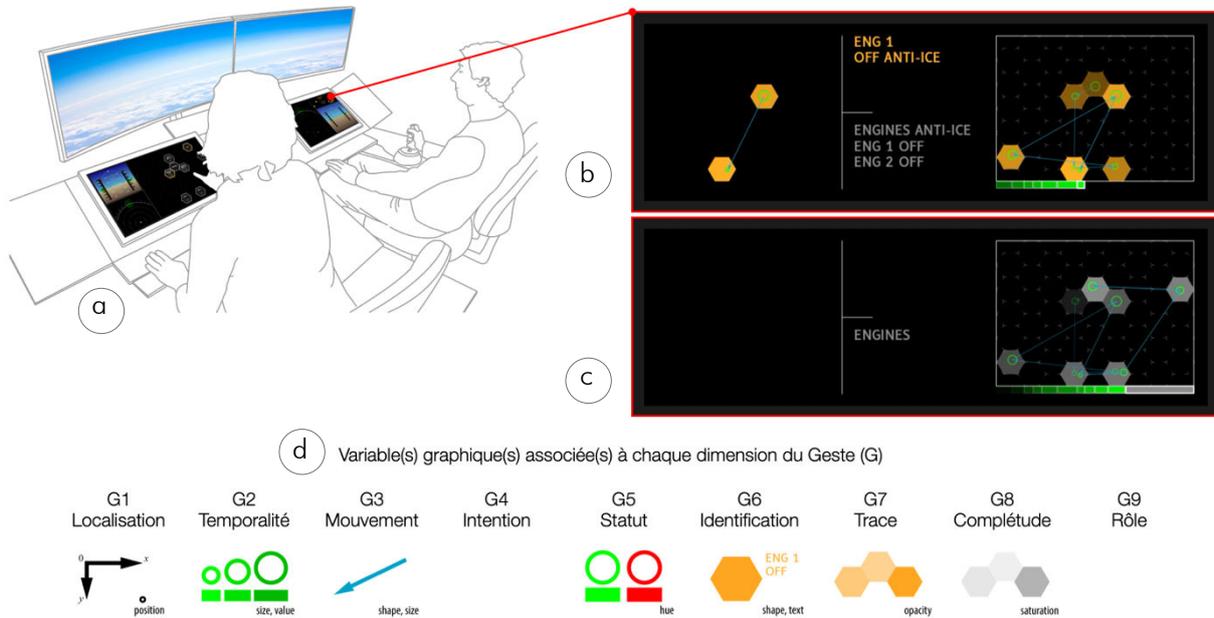


Figure 90. Descriptif du Design 1 avec une mise en situation sur la plateforme (a) ; deux illustrations de l'interface GV représentant : un geste réalisé pendant un flot procédural (b), le flot terminé (c) ; une vue des variables graphiques associées aux dimensions des gestes (d).

C'est le premier graphique présenté aux pilotes. Il est divisé en deux parties (cf. Figure 90). A gauche il y a une représentation du geste en cours d'exécution tandis qu'à droite, nous représentons l'ensemble de la séquence gestuelle. Nous avons choisi cette segmentation car elle offre deux niveaux de lecture : celle du dernier geste réalisé et celle d'une perception synthétique de la progression de la procédure. Lorsque le PM sélectionne un menu ou une fonction sur le panneau de contrôle des systèmes avioniques, deux hexagones s'affichent sur le côté gauche avec son nom (e.g. ENG 1) et son état (e.g. ON ANTI-ICE), indiquant la position précédente puis actuelle de son doigt sur l'écran. Un cercle apparaît pour symboliser ces positions. A droite, une copie de ces mêmes hexagones sont ajoutés à la séquence gestuelle et un nouveau rectangle apparaît sous le flot procédural. La taille des cercles et des rectangles augmente en fonction de la durée du contact. La couleur de l'état reflète l'état du geste tactile, soit vert pour "ok", rouge si un problème est survenu dans la reconnaissance gestuelle. Chaque fois que le PM sélectionne une nouvelle fonction, un nouveau cercle et un nouveau rectangle apparaissent de la même manière. La dénomination de la fonction précédente est déplacée vers le bas puis sa teinte est supprimée. Tous les déplacements de la main entre les points de contact sur la surface sont représentés par des flèches bleue. Nous avons choisi la forme de flèche parce que c'est la meilleure façon de comprendre immédiatement le mouvement (McAweeney, Zhang, and

Nebeling 2018). Comme nous avons plusieurs gestes à représenter, cibler le centre des cercles facilite la pré-attention (Bertin 1967). Dans la séquence gestuelle à droite, les hexagones des gestes perdent un niveau de saturation (5%) à chaque nouveau geste. Nous avons associé la saturation à la persistance graphique car cette variable graphique permet une lisibilité ordonnée et sélective (cf. 3.4.1). Lorsque le déroulement de la procédure est terminé, la variation de teinte est supprimée pour l'ensemble de la représentation.

5.4.2 Design 2 : Timeline

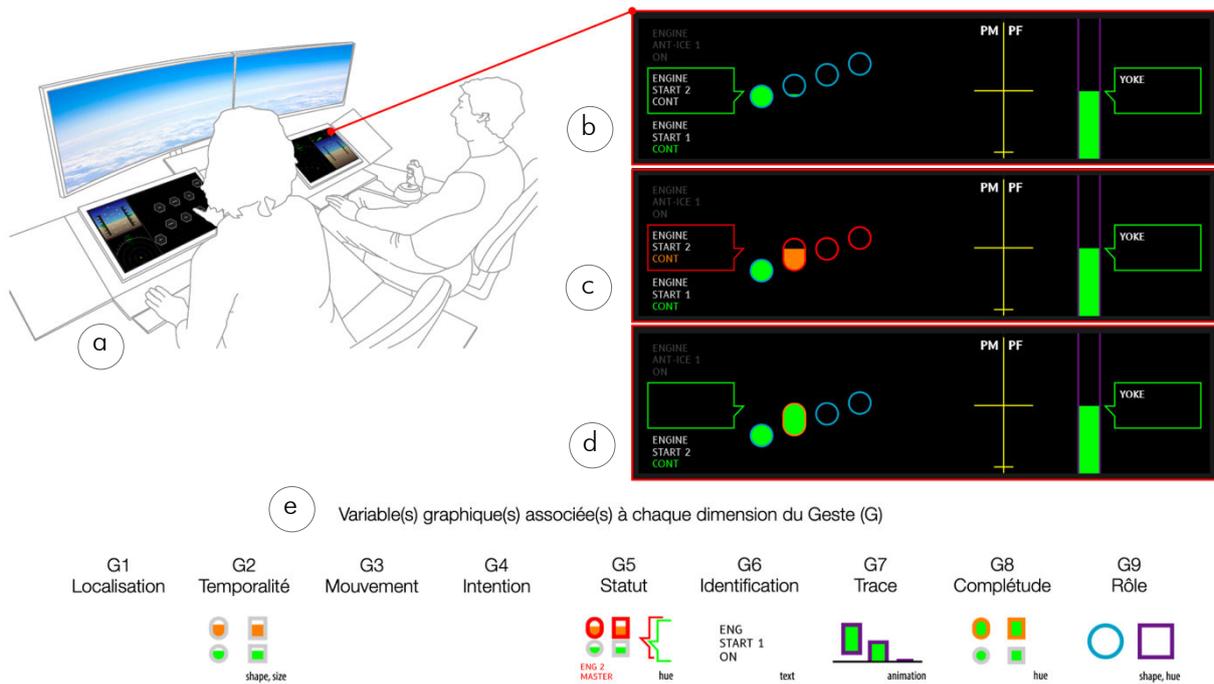


Figure 91. Descriptif du Design 2 avec une mise en situation sur la plateforme (a) ; trois illustrations de l'interface GV représentant : le PM est en train de faire un geste dans le cadre d'un flot procédural (b), ce geste dépasse la durée recommandée par le système avionique pour accomplir l'action (c), l'action est accomplie (d) ; une vue des variables graphiques associées aux dimensions des gestes (e).

Cette deuxième conception (cf. Figure 91) introduit la notion aéronautique de recouvrement avec les actions des deux pilotes affichées ensemble sur le même écran (PM à gauche, PF à droite). Les flots gestuels attendus, connus du système, sont affichés sous forme de cercles vides, sur le côté gauche pour le PM, sur le côté droit pour le PF. Les cercles vides ont un contour bleu pour le PM et un carré vide avec un contour de couleur violette pour le PF. Les dimensions des cercles et des carrés ont été définies pour une durée moyenne selon nos observations aéronautiques (cf. 2.3.2). Lorsqu'un des pilotes touche son écran pour activer une fonction, le cercle ou carré correspondant se remplit. Encore une fois, la couleur définit le statut du geste, vert par défaut. Si la pression est trop longue, la couleur devient orange, avec un contour rouge, et la forme devient oblongue. Trois éléments de texte représentent les fonctions précédente, actuelle et suivante à activer. La suivante est sans variation de teinte. La fonction courante est mise en surbrillance par une bulle, la couleur de la bulle étant de nouveau associée à l'état, et la pointe pointant vers le

temps courant. Les formes se déplacent de haut en bas en suivant l'avancée du vol (« comme dans Guitar Hero », dit un pilote). Les formes d'un flot procédural sont positionnées à proximité les unes des autres, afin que le pilote puisse immédiatement identifier les relations entre les gestes, en appliquant la loi de proximité de la théorie de la gestalt (cf. 3.4.2). Le pilote peut activer une fonction qui n'est pas prévue dans la procédure standard, une nouvelle forme vide apparaît en conséquence.

5.4.3 Design 3 : Bricks

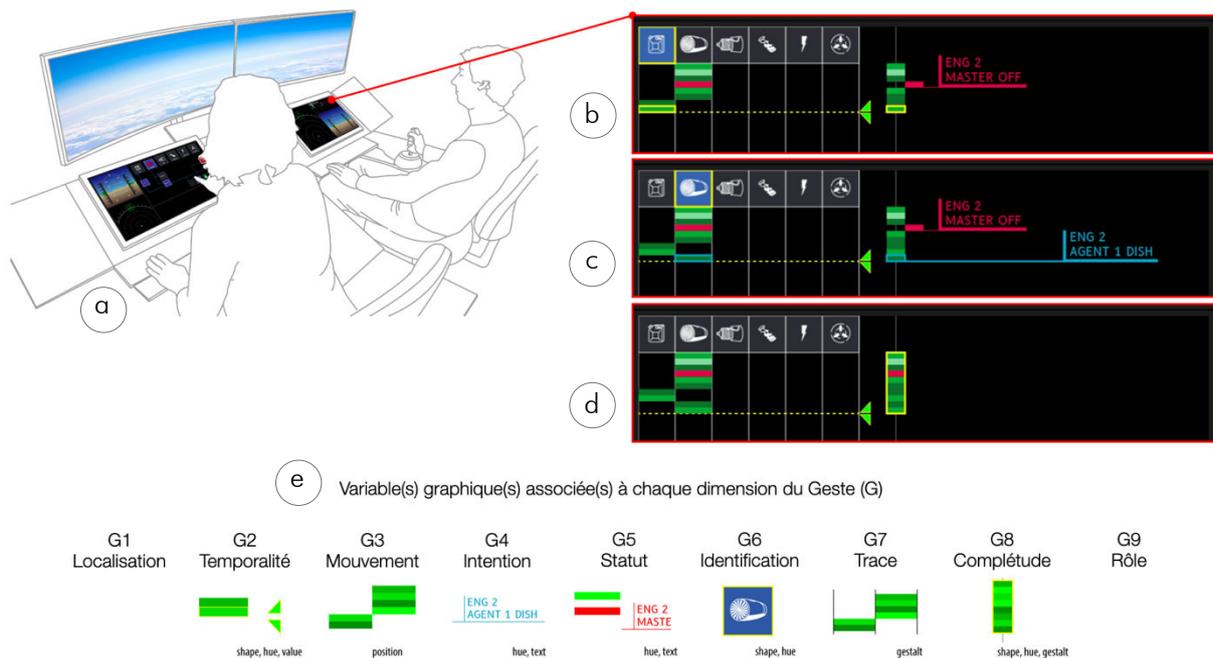


Figure 92. Descriptif du Design 3 avec une mise en situation sur la plateforme (a) ; trois illustrations de l'interface GV représentant : le PM est en train de faire un geste dans le cadre d'un flot procédural (b), le PM demande la confirmation au PF pour accomplir son geste sur la fonction « ENG 2 Agent 1 dish » (c), le flot procédural est accompli (d) ; une vue des variables graphiques associées aux dimensions des gestes (e).

Contrairement au premier design et en accord avec les commentaires des pilotes, la dimension de localisation et la dimension de mouvement du geste ne sont pas associées aux positions réelles des gestes sur l'écran (en x et y) mais directement d'après leurs rapports aux fonctions des systèmes avioniques associés (mentionnées par leurs pictogrammes). Notre intention avec ce design (cf. Figure 92) est d'atteindre une convergence des informations. Au niveau de la dimension du statut, là encore, la couleur informe de l'état des informations prises en compte par l'avionique. Vert ou rouge informe si une "erreur" se produit ; bleu informe le PF qu'une validation est nécessaire (contrôle croisé). La variation de saturation informe le pilote sur la durée de la réalisation du geste : plus le geste est long, plus la saturation diminue. De manière atomique, cette information n'est significative que lorsqu'elle est associée à un flot. Grâce à la loi de similitude (cf. 3.4.2) de la gestalt, le

pilote peut discerner le rythme de son collègue pour ainsi ressentir des informations comme la fatigue où le stress. Par exemple, si tous les gestes sont rapides alors que la situation exige au contraire une retenue, cela peut signifier au pilote qu'il est nécessaire d'engager un dialogue avec son collègue sur la situation.

5.4.4 Design 4 : Onion

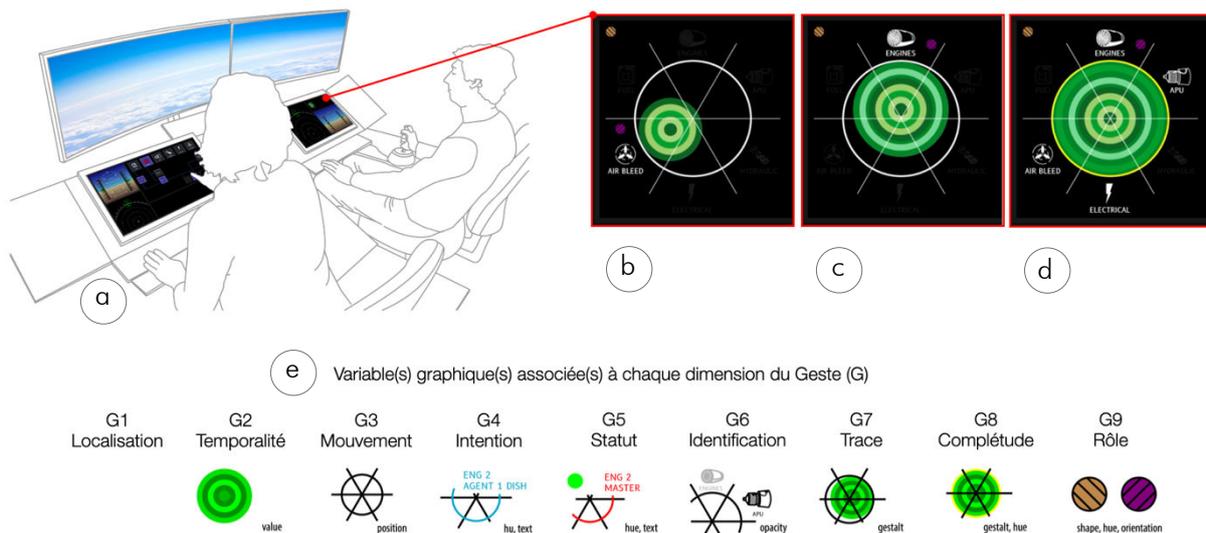


Figure 93. Descriptif du Design 4 avec une mise en situation sur la plateforme (a) ; trois illustrations de l'interface GV représentant : le PM est en train de faire un geste dans le cadre d'un flot procédural (b), le PM progresse dans l'exécution de son flot procédural (c), le flot procédural est accompli (d) ; une vue des variables graphiques associées aux dimensions des gestes (e).

Le quatrième design (cf. Figure 93) s'inspire des lois de la gestalt. Nous voulions discuter d'une vision synthétique de l'information avec les pilotes. Les six systèmes sont répartis également à l'intérieur d'un cercle et sont respectivement indiqués par un pictogramme et une légende. Les gestes sont représentés par des cercles. Chaque geste successif s'accumule autour d'un point. La position du petit cercle dans le cercle environnant est mise à jour à chaque nouveau geste en se plaçant dans le triangle associé au système dans lequel le geste a eu lieu. Pour mettre en évidence la fonction du dernier geste effectué, le pictogramme du système correspondant est affiché tandis que les autres voient leurs opacités réduites à 20%. A chaque nouveau geste, un nouveau cercle apparaît avec un diamètre supérieur à celui du geste précédent. Une fois le flot gestuel terminé, le diamètre du dernier geste remplit le cercle environnant et annonce visuellement la complétude du flot gestuel.

5.4.5 Design 5 : Finger Shadow

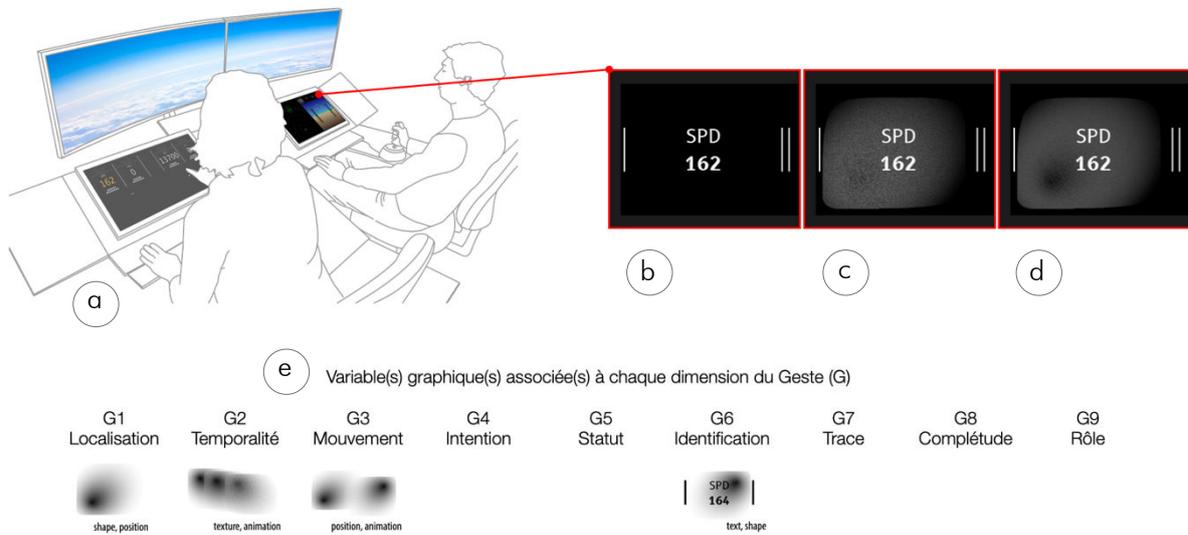


Figure 94. Descriptif du Design 5 avec une mise en situation sur la plateforme (a) ; trois illustrations de l'interface GV représentant : l'état idle de la fonction Speed (SPD) du *Flight Control Unit* (FCU) (b), une empreinte apparaît pour signifier le contact du doigt du PF en bas à gauche de la fonction SPD du FCU (c), le cercle de l'empreinte s'élargit et le grain disparaît progressivement suivant la durée de contact (d) ; une vue des variables graphiques associées aux dimensions des gestes (e).

Contrairement aux quatre précédents designs et à partir de celui-ci jusqu'au design 8, les interactions visent à modifier des paramètres de vol tel que la vitesse ou le cap vers le pilote automatique (scénario S3). L'interface du pilote assis à gauche n'est plus une représentation de l'*Overhead panel* mais une représentation d'un panneau de contrôle du pilotage automatique (FCU ou *Flight Control Unit*, cf. 5.3). Nous avons exploré la notion de matérialité avec le concept d'empreinte gestuelle (cf. Figure 94). En effet, pour identifier ce qu'un pilote pourrait interpréter comme une action physique réelle avec sa forme matérielle, par opposition à l'information provenant du système, on prend le toucher de l'empreinte digitale avec sa forme et sa propre dynamique. Lorsque le PF touche l'unité de commandes de vol, deux éléments graphiques apparaissent : l'origine du point de contact représenté par un cercle et une forme rectangulaire composée de grains texturés qui identifient la fonction avionique sujette à modification. Nous avons choisi d'associer la durée du contact à une animation pour déclencher une persistance graphique pour le pilote. En effet, la combinaison d'une animation avec une variation d'opacité a été décrite (Hurter and Conversy 2007) comme un moyen efficace de montrer la progression temporelle. Lorsque le temps de contact s'allonge, la taille du cercle augmente et la texture de la forme rectangulaire semble se disperser. Quatre formes sont possibles en fonction de la position du doigt sur l'écran du FCU. Leur orientation se différencie par la forme du coin. Comme le montre la figure 94, le PF a touché la zone inférieure gauche.

5.4.6 Design 6 : Button Shadow

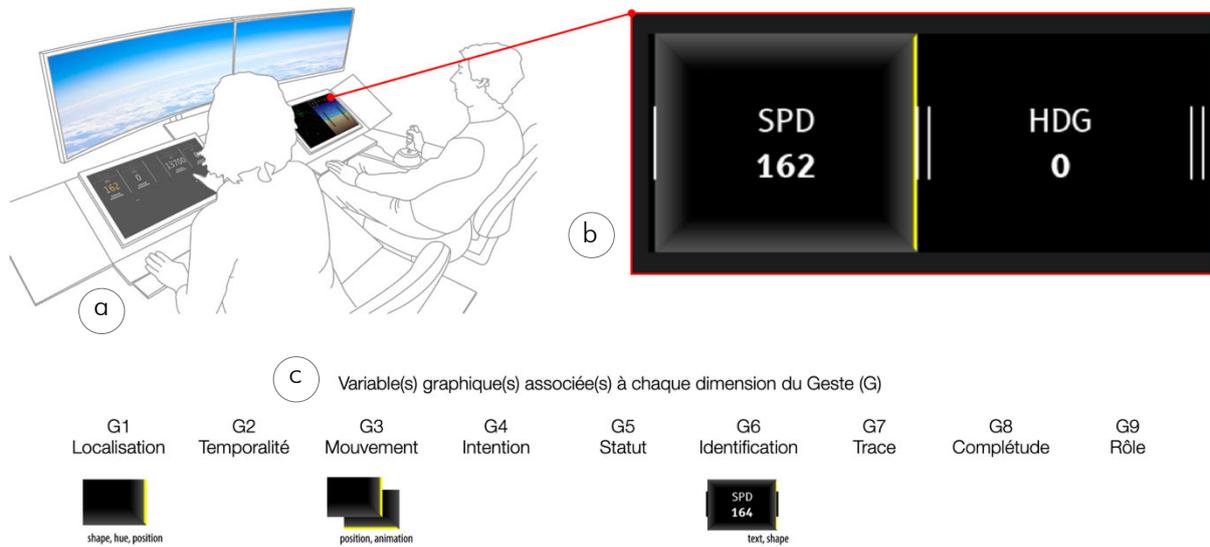


Figure 95. Descriptif du Design 6 avec une mise en situation sur la plateforme (a) ; une illustration de l'interface GV représentant : une ligne apparaît pour signifier le contact du doigt du PF à droite de la zone d'interaction sur la fonction Speed du Flight Control Unit (b) ; une vue des variables graphiques associées aux dimensions des gestes (c).

La représentation graphique du sixième design (cf. Figure 95) est une proposition critique par rapport à *Finger Shadow* : le geste n'est plus représenté comme une empreinte gestuelle, il est seulement déduit. Il s'agit d'un niveau de représentation plus abstrait : le pilote doit savoir comment le système fonctionne afin d'obtenir une représentation cognitive du comportement gestuel. Lorsque le PF appuie sur le FCU, deux éléments apparaissent. Le premier est un rectangle permettant au co-pilote d'identifier la fonction soumise à un changement d'état. Les coins de ce rectangle prennent une échelle de gris pour mettre en évidence la fonction par rapport au fond. Le point de contact est suggéré par l'apparition d'une ligne jaune sur le bord du rectangle le plus proche.

5.4.8 Design 8 : Rim Texture

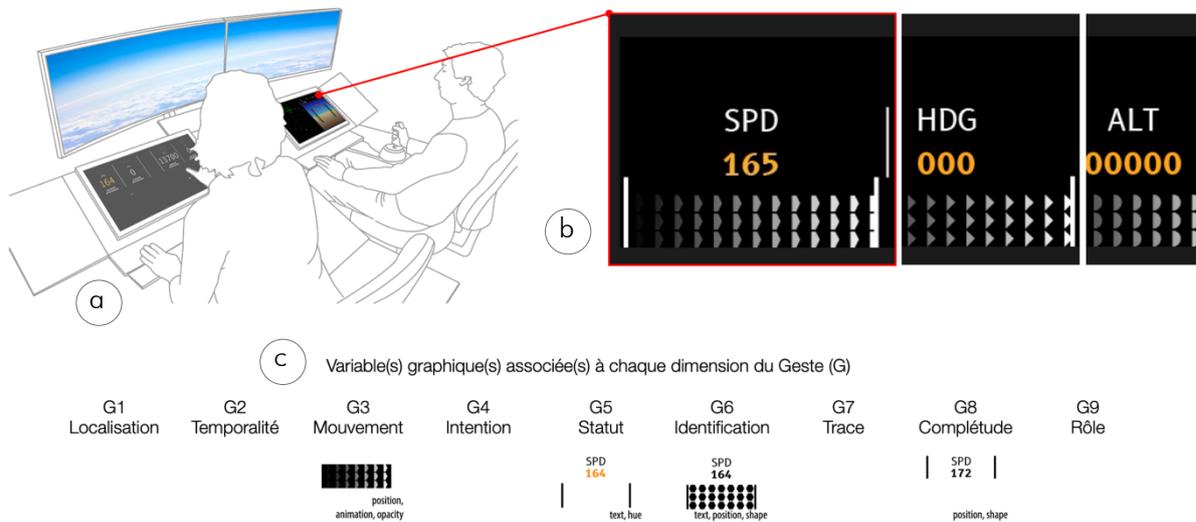


Figure 97. Descriptif du Design 8 avec une mise en situation sur la plateforme (a) ; une illustration de l'interface GV représentant : les différents grains utilisés pour signifier le déplacement du geste vers la gauche ou la droite sur le *Flight Control Unit* (b) ; une vue des variables graphiques associées aux dimensions des gestes (c).

Dans le huitième modèle (cf. Figure 97), lorsque le PF glisse vers le bas, le mode de sélection est activé. Ce mode permet au pilote de modifier la valeur du paramètre, qui est obtenue par un glissement vers la gauche pour diminuer la valeur ou vers la droite pour l'augmenter. Nous avons choisi d'utiliser le grain comme variable graphique, en nous inspirant des boutons encochés du FCU actuel. En effet, chaque fonction a une perception haptique différente. De plus, les formes symétriques qui ont été sélectionnées peuvent être coupées en deux pour indiquer une direction.

5.5 RESULTATS

Dans cette section, nous décrivons les connaissances acquises au cours des visites de terrain avec les pilotes. Ici, notre intention n'est pas d'évaluer chaque conception, mais plutôt de recueillir et de résumer les leçons importantes tirées de cette exploration. Pour cette raison, les idées peuvent être soit directement liées aux composantes décrites dans la section design, soit tirées de l'analyse des séances transcrites. Les conceptions qui participent à la rétroaction des pilotes sont désignées par leur numéro (D1, D2, etc.) et les pilotes ont été rendus anonymes (P1, P2, etc.).

5.5.1 Identification du système implicite sans spatialisation

Les travaux ont clairement mis en évidence la nécessité d'avoir une identification précise des systèmes impactés. En fait, les écrans interactifs rendent obsolète la mémorisation spatiale des flots gestuels réalisés par des mouvements physiques, et fournissent un moyen plus simple d'atteindre le même résultat : « Après, pour revenir à ce qui t'as amené ici, c'est-à-dire cette perte de spatialité, ce que tu peux faire c'est juste mettre une ligne en disant bah il touche à la partie moteur [...] Tu n'as pas besoin de mémoriser un flot géographique. C'est plutôt un ordre de séquence. » [D1.G6, P2]. ou : « Donc ce qui serait pas mal c'est d'avoir le nom de la checklist, ça me permet de moi, je pilote, et je vois que t'es bien rentré dans la checklist que je t'ai appelé » [D3.G8, P4]. Par conséquent, les dimensions de localisation et de mouvement des gestes ont clairement été jugées inutilisables. De plus, la capacité d'identifier sans ambiguïté une fonction dans le scénario FCU (S3) a même été décrite comme étant si critique qu'un pilote a constaté qu'il n'était pas pertinent de montrer une hésitation du doigt entre deux boutons : « Alors que le un seul bord, ça focus à moitié quoi. Il se passe quelque chose là-dessus mais on est obligé d'attendre » [D6.G1, P5].

5.5.2 La complétude

La représentation de la complétude du flot procédural est apparue comme un besoin important. Les pilotes ont notamment commenté les procédés utilisés pour l'illustrer, tels que l'alignement, le remplissage et les variables de couleurs.

Alignement

Il est important de noter que les pilotes préconisaient le recours à l'alignement. Cet intérêt peut être lié au concept *dark cockpit* dans la conception d'Airbus, où l'obscurité signifie que tout est satisfaisant et qu'il ne reste rien à faire. Ici, c'est l'alignement de chaque élément qui signifie l'achèvement, conformément au principe de continuité de la Gestalt (cf. 3.2.2), alors qu'un élément décalé signifie qu'il y a encore des actions à effectuer. Par exemple, un pilote a suggéré de changer les hexagones en carrés pour qu'ils puissent être alignés ensemble : « C'est de placer les compteurs de telle manière que graphiquement tu vois que tout est aligné. Tu sais que tout a été fait, en fait » [D1.G8, P4]. Cela a favorisé la conception des alignements pour les designs D3 et D4. Il a également suggéré qu'avoir des boutons alignés dynamiquement plutôt que des boutons placés statiquement serait un avantage : « Parce qu'en fait on mémorise une forme parce que les boutons sont là mais si on pouvait déplacer les boutons ce serait merveilleux. On les alignerait tous. Que les boutons changent de place en fonction de la panne » [D1.G1, P4]. A l'inverse, les actions omises, les « *opens items* » [D1.G8, P2], ou les actions restant à faire étaient appréciées lorsqu'elles étaient décalées ou marquées par une couleur : « Ce qui est intéressant c'est de savoir s'il y a un item qui a été sauté, il faut qu'il y ait un carré rouge. Et dans ce cas-là, s'il y en a un qui a été sauté, c'est intéressant qu'on sache lequel » [D3.G8, P5].

Remplissage

Un pilote a suggéré d'appliquer ce choix graphique au moyen d'une déclinaison du design *Onion* : « En même temps ton rond, mais moi à la limite ce n'est pas un rond que je ferais remplir, ce serait plutôt le camembert. Parce que là tu vas remplir des actions moteur, et tu vas remplir des actions fuel, en fait ton camembert il se remplit au fur et à mesure, et le fuel, toutes les actions attendues sur le fuel et à la limite s'il n'y a pas d'action APU, s'il n'y a pas d'action... à la limite tu les mets en grisé. C'est le morceau de camembert qui se remplit pour chaque item attendu et à la fin tu as tous les camemberts, comme au trivial poursuite quoi. Tu vois parce que le rond à l'intérieur d'un camembert ça ne me parle pas. Étant donné que cela n'a pas de sens parce que tout est rempli mais tu n'as jamais fait d'APU, d'Air Bleed par exemple » [D4.G6, P4].

Couleurs

L'utilisation de la couleur verte pour mettre en valeur la complétude a été appréciée, conformément aux normes de codage couleur en vigueur dans l'aéronautique (cf. 1.4.1). Toutefois, l'utilisation d'un symbole a été préférée à un contour jaune : « Moi j'aime beaucoup le symbole américain tu sais, le petit V. Tu vois à la fin, le petit check. » [D3.G8, P4] ou l'utilisation d'une barre de progression : « Il me manquerait juste une barre de progression pour dire « completed à 100% » ou pas. [...] Que je sache où j'en suis par rapport à la complétion totale de la checklist » [D3.G8, P1].

5.5.3 Les dimensions temporelles dans la conscience mutuelle

Les pilotes avaient plusieurs commentaires sur le temps, soit liés à la perception d'éléments temporels objectifs, comme la durée, le passé, soit à la perception des choses par des dimensions temporelles plus subjectives, comme la vitesse, le retard, la régularité, le rythme, le contrôle, la hâte, la finesse ou la prudence.

Durée

Les designs de la première catégorie, en particulier ceux abordant des durées objectives, ont souvent été critiqués comme n'étant pas pertinents pour la sensibilisation : « Après être au détail de savoir combien de temps il a appuyé avec l'hystérèse tout ça, ça honnêtement ça n'a aucun intérêt opérationnel » [D1, G2, P5]. Par conséquent, représenter la durée d'un contact par la taille d'un cercle n'était pas considéré comme bénéfique : « Moi j'en reviens à la taille des cercles, pour moi c'est une information qui vient charger le display, pour moi franchement superflu » [D1.G2, P5]. En fait, la perception de la durée est aussi sujette à la perception individuelle et contextuelle. Des conditions très angoissantes conduisent parfois à perdre le rapport objectif au temps (cf. 1.2.4), comme pour P1 : « Par exemple là où c'est compliqué aussi c'est pendant ces pannes-là, on perd totalement la notion du temps. Tu vois par exemple des fois tu peux avoir une panne moteur au décollage [...] et pendant trois minutes tu cherches « putain mon avion, il

ne monte pas il ne monte pas » et tu ne comprends pas, tu mets plein gaz, et tu refais la checklist avant atterrissage et là tu dis, bah « gear down » et là le train il n'était pas sorti alors que ça fait trois minutes que tu as l'alarme qui gueule. Tu vois la notion du temps tu la perds. » [D3.G2, P1].

Régularité

La régularité dans une séquence d'actions est significative (cf. 2.3.2.D) : « On reprend celle-là où c'est action panne moteur par exemple, tu vas avoir on va dire dix actions, ce qui m'intéresse c'est qu'elles se font à un rythme. C'est-à-dire qu'il va toucher un ou deux boutons en haut, sa main va descendre, il va toucher un bouton ici avec le même rythme, là il y a en a un par exemple pour couper l'arrivé du fuel, logiquement ça va être un peu plus long parce que tu réfléchis à deux trois fois pour savoir si tu coupes le bon. » [D3.G2, P2] ou : « Quand tu es sur un flot, tu l'as travaillé des dizaines de fois au simu (simulateur), avec ton collègue tu le trouves c'est une musique » [D1.G2, P2]. On a insisté sur le fait que cette régularité permettait de savoir si l'autre pilote se portait bien ou s'il avait la maîtrise de la situation : « Et là ça me dit, je sais où tu en es grosso modo, que tout se passe bien dans le déroulement de la checklist et puis voilà c'est ça qui m'importe » [D3.G2, P4]. Cela peut aussi mettre en évidence une rupture dans la séquence gestuelle comme par exemple un problème : « Si au bout de 30 sec je vois que le flot n'est pas terminé, je vais lui demander ce qu'il fait » [D1.G2, P5]. Pour exprimer la régularité, le design *Bricks* a été jugé plus pertinent que le design *Onion* : « Je trouve ça [D4] moins explicite que le précédent [D3]. Parce que en fait, comme dans ta tête, une action ça va être une séquence, le fait que tac tac tac ça s'empile (mouvement des bras descendant). Tout de suite tu comprends que une fois que c'est empilé... là bon c'est vrai que... bon... » [D3.G7/D4.G7, P4]. Le design *Bricks* crée des zones vides qui permettent de dissocier clairement les colonnes, ce qui peut s'expliquer par la loi de la Gestalt où le premier plan est surligné sur le fond.

Le passé

Les pilotes ont estimé que la représentation de la trace des gestes passés n'était pas très pertinente : « Une fois que c'est fait, euh on s'en fout du passé » [D3.G8, P4], sauf si quelque chose s'est mal déroulé, ce qui est en fait rendu plus visible dans une séquence nominale : « Par contre tu seras interpellé si le gars il saute un item et qu'il en manque un. A la limite s'il le saute, là (en pointant son écran) c'est intéressant d'avoir une trace et s'il y a une raison x ou y, on en discute quoi » [D3.G7, P4]. L'animation de la dimension de la trace du dernier geste peut cependant être intéressante en cas d'inattention visuelle temporaire : « Tu as quatre carrés hein ? [...] Ouais moi j'aime bien ça. Là tu vois tu n'as plus ton doigt, il est parti mais j'ai encore un rappel de comment il était, où il était, etc. [...] Et puis ça à un autre avantage en dehors de ça c'est que supposons que j'ai un petit peu d'inattention bon tu reviens dans ton

circuit visuel de temps en temps sur quoi, du coup il faut quand même que ton bouton ce ne soit pas un flash quoi » [D5.G2+G7, P3].

Contrôle

Le stress est « ressenti par des actions qui ne sont pas fluides » [D1.G2, P2], de sorte que la vitesse doit être interprétée dans un flot gestuel : « Et puis surtout que la rapidité du mouvement ça peut vouloir dire pleins de chose, soit qu'il y a eu une aisance, une assurance et il va vite, soit qu'il y a un moment de stress » [D8.G2, P2]. On peut s'attendre à un peu de prudence en cas d'actions irréversibles, ce que l'on peut ressentir par une légère pause dans le déroulement, qui peut être représentée dans un dessin par la variation de saturation : « Ça va aller très vite sur une partie du flot parce qu'il le connaît, puis après il va y avoir un appel à la réflexion, ah ouais, il y a ça, hop, et il va finir » [D1.G2, P2]. Dans le design *Finger Shadow*, c'est la persistance graphique de l'empreinte digitale qui transmet une pause : « Je trouve particulièrement bon de savoir que l'autre personne peut continuer à presser... et donc qu'elle a un doute, et que cela ne va pas tout de suite se transformer en une valeur » [D5.G2, P2]. Par ailleurs, la perception du retard peut permettre de déceler une anomalie : « ce n'est toujours pas fait alors que tu es supposé le faire » [D3.G2, P4], le pilote a suggéré de faire clignoter la zone dans un tel cas : « si au bout de 3-4 secondes, le système à vu que tu ne l'as pas encore fait, moi de mon côté ce qui m'intéresse, c'est à la limite c'est que ça blink, pour me dire il prend du temps » [D3.G5, P4]. Le design *Button Shadow* a été perçu par un pilote comme indiquant potentiellement une hésitation ou même une erreur en ce qui concerne la zone de paramètres ciblée : « l'intérêt par rapport à l'autre [D5] est... « mais qu'est-ce qu'il fait ? Il ne sait pas ce qu'il fait ? » Alors que sur l'autre représentation que tu avais c'était binaire, c'était l'un ou l'autre... » [D6.G1, P3].

5.5.4 Niveaux de conscience et de coordination dans la collaboration

On peut distinguer deux types de conscience mutuelle : la première est fondée sur le sentiment d'être présent et sur le fait qu'une activité est en cours ; la seconde est plus en lien avec le contrôle de la situation : il s'agit d'évaluer si la situation se déroule correctement par rapport aux exigences du vol.

La prise de conscience par des gestes et des rythmes expressifs appartient à la première catégorie mais elle a aussi un impact sur la sécurité, car elle indique potentiellement la condition de l'autre pilote : « Moi ce que je trouve bien effectivement c'est sans avoir à regarder le collègue de voir bah déjà s'il est là. Donc en terme d'incapacitation c'est une très bonne information » [P5], confirmée par un autre pilote : « en tant que Captain, je trouve ça intéressant par souci de surveillance » [D1, P2]. Elle peut être considérée comme intrusive : « ... un peu intrusif peut-être. Il ne faut pas que cela devienne un moyen de flicage » [D1.G2, P2]. En fait, les pilotes préfèrent une représentation plus abstraite ou approximative,

comme un rythme, ou même simplement savoir quel système était touché par une action, plutôt que la fonction exacte : « J'ai vu que tu as agis sur le carburant, donc a priori tu as du couper des choses, tu as agis sur le moteur, tu as coupé des choses, et euh par exemple là je pense que c'est l'électricité, tu as du connecter des génératrices ou des choses comme ça [...] tu vois ça me parle tout de suite dès que je le vois comme ça donc c'est pas mal » [D3, P1].

En ce qui concerne la conscience au sein de la coordination, les pilotes ont apprécié la possibilité d'interagir directement par le biais de *GestureView*, ce qui a réduit le besoin de coordination orale. Ils ont également apprécié la possibilité d'effectuer des tâches de coordination sans relâcher l'attention visuelle et d'en faire le suivi : « puis voilà quand tu as un *confirm* à faire, voilà « tchouk ». Et même à la limite si tu veux garder ta traçabilité, là il y aurait marqué *confirm* (en pointant *GestureView*) et une fois que c'est confirmé tu peux imaginer qu'il passe en blanc. Qu'il reste pour dire « on l'a confirmé ». Tu vois parce qu'à la relecture du *memory items*, on sait qu'on a bien fait le truc, et là, là c'est vraiment un travail d'équipage » [D3.G7, P4]. Cela donne aux pilotes un degré supplémentaire de conscience mutuelle.

Enfin, tous les pilotes ont apprécié le fait d'avoir *GestureView* en face d'eux parce que cela leur évite de tourner la tête et de se détourner de leurs tâches : « Je n'ai pas besoin de quitter ma trajectoire des yeux, et en même temps je vois que ma checklist elle progresse quoi. Donc je trouve ça super bien » [D3, P1] ; « Là déjà dans un premier temps je vois tout de suite ou est-ce qu'il a la main sans avoir besoin de forcément tourner la tête et peut-être de rentrer dans autre chose, euh donc c'est moins... ça m'interromps moins puisque finalement je l'ai en face » [D5.G6, P3].

5.5.5 La matérialité

Les pilotes ont commenté les designs qui apportent des détails pour donner plus de « matérialité », par exemple la rugosité d'un bouton (D8), la forme du doigt (D5), ou une nuance perceptuelle dans les couleurs (D1, D3, D4).

Plusieurs pilotes ont aimé la dimension sur la trace avec la disparition progressive de l'empreinte sur le design *Finger Shadow* : « Là tu vois tu n'as plus ton doigt, il est parti mais j'ai encore un rappel de comment il était, où il était » [D5.G2+G1, P2+P3]. L'utilisation de la variable visuelle « floue » pour le design *Blurring* a déclenché deux réactions opposées. Pour certains pilotes, le flou reflétait efficacement un mécanisme de perception visuelle : « Ouais, le côté flou c'est pas mal, [...] c'est vrai que ton œil plus c'est loin plus c'est flou [...] Tu peux vraiment jouer sur des valeurs, alors à mon avis tu ne peux pas mettre deux-cents valeurs de flou, ça serait trop. Mais peut-être que sur une petite dizaine tu vois et ça fait dix valeurs. C'est quand même énorme hein dix valeurs et tu... et c'est vraiment très naturel comme truc. Je pense que tout le monde le percevrait assez bien ça » expliquant aussi cela : « la couleur au final c'est vite agressif quoi » [D7, P2]. Son collègue a développé ce commentaire en soulignant

la progressivité : « Dès que tu as finis celui-là [montre la fonction *speed*] et que tu passes sur un autre, il se floute progressivement, l'autre devient super net, et donc tu as un changement super progressif » [D7, P3]. Toutefois, un autre pilote a évalué le flou comme étant dangereux parce qu'il empêchait le libre accès à l'information : « En termes d'informations, ce qui intolérable, c'est de pas pouvoir y accéder. Tu comprends ce que je veux dire, quand t'es dans un cockpit, tu peux éventuellement ne pas tout donner mais il faut pouvoir y accéder. Ce qui est vraiment embêtant c'est quand tu ne peux pas y avoir accès. Tu n'es pas censé tout savoir mais par contre t'es censé pouvoir tout trouver » [D7, P5]. Le design *Rim Texture* impliquait également la matérialité et la perception, mais elle s'est avérée non pertinente. L'imitation des différents crans des boutons avec la variable de grain, destinés à les différencier, était trop fine pour être remarquée : « Je ne suis pas sûr que ça change grand-chose par contre ce qui peut être intéressant c'est que quand tu le fais défiler alors là qu'on est un indicateur de tendance : augmentation, diminution » [D8.G3, P3]. Enfin, étant donné que les couleurs sont une information système hautement codifiée, il faut éviter de fournir des dégradés ou des nuances de couleurs : « Moi je verrai plutôt du *ON*, *OFF*. Parce que là tu vois comme ce n'est pas très évident le gradient d'opacité, il faudrait qu'il soit plus marqué » [D1.G8, P5].

5.6 DISCUSSION

L'étude a clarifié le choix de représenter les gestes, ou l'effet des gestes. Les pilotes ont confirmé que la représentation d'éléments objectifs des gestes, sans parler de la main ou des doigts, n'avait aucun intérêt opérationnel. La dimension de la localisation des gestes basées sur ses coordonnées dans l'espace pour identifier les actions a également été jugée obsolète avec l'avènement de l'affichage dynamique. L'étude a également confirmé que les représentations de l'effet fournies aux pilotes peuvent être soit axées sur les *résultats*, contenant les retours d'informations avioniques, soit axées sur les *impressions*, avec des éléments subjectifs et perceptifs. Les représentations axées sur *l'impression* ont été jugées pertinentes, en particulier pour améliorer la conscience mutuelle lors des situations non-nominales. Il s'agit de représentations graphiques qui traduisent la régularité, l'erreur, la réflexion, les hésitations, ainsi que d'éléments graphiques qui traduisent la matérialité, comme l'affichage d'une empreinte digitale. Les résultats conduisent également à une conclusion positive sur la combinaison de représentations axées sur *l'impression* et sur les *résultats*. Cette combinaison est plus efficace dans certaines conceptions, comme le *Finger Shadow* ou les *Bricks* qui transmettent des informations sur la dynamique ou la physicalité des gestes superposés aux éléments des systèmes avioniques. Une leçon importante à retenir est que les représentations axées sur *l'impression* devraient être en mesure de révéler les interactions, tout en conservant des représentations axées sur les *résultats* hautement prioritaires. Cette exigence n'est pas respectée avec les modèles *Onion*, *Blurring* et *Button Shadow*.

5.7 CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre une exploration des conceptions visant à améliorer la conscience mutuelle entre les pilotes d'avions de ligne confrontés aux écrans tactiles en complétant les gestes tactiles par des éléments graphiques. Grâce à l'analyse de l'activité, au travail de conception graphique et aux ateliers de conception participatives, nous fournissons des dimensions et des règles graphiques permettant de combiner des représentations gestuelles basées sur des *impressions* et des *résultats*. Les futurs travaux sur cette conception devraient tenir compte du fait que toutes les dimensions, à l'exception de la localisation, sont validées et que la temporalité et la trace doivent être conservés, mais uniquement pour leur effet subjectif. Plusieurs aspects graphiques doivent être maintenus : couleur, grain, continuité (alignement), saturation, forme (pictogrammes), animation. Cependant, le flou doit être éliminé. Il faut désormais inclure dans le processus d'évaluation de nos designs, des équipages composés de deux pilotes d'avion de ligne pour enrichir les retours qualitatifs (cf. chapitre 6).

6 EVALUER GESTUREVIEW EN CONTEXTE COLLABORATIF

Nous proposons dans ce chapitre un nouveau design pour *GestureView*. Les choix de conception sont issus d'une réflexion basée sur les résultats des pilotes professionnels (cf. 5.5). L'ambition principale de ce travail est de valider nos clés de compréhension sur les dimensions des gestes utiles au travail collaboratif grâce à notre outil de suppléance graphique, afin d'apporter des éléments de réponse à l'une de nos questions de recherches :

Comment une représentation peut-elle restituer pré-attentivement la conscience mutuelle transmise par les dimensions des gestes numériques ?

Pour ce faire, des pilotes professionnels ont été invité à collaborer ensemble sur des scénarios basés sur l'activité de pilotage. A l'inverse du précédent travail, chaque séance requiert la présence de deux pilotes professionnels afin de former un équipage. Les scénarios sont exécutés sur la plateforme modulable (cf. 4.4.1) avec une disposition du matériel (écran, joystick) prévue à cet effet. Afin d'évaluer *GestureView* les pilotes disposent, comme pour la précédente étude, d'un affichage graphique de suppléance.

En complément, dans le but d'évaluer la capacité pré-attentive de notre dispositif, nous avons organisé une session avec des participants non-pilotes. Il leur a été demandé de mémoriser des informations (identification des fonctions, comptage des systèmes impliquant un geste, repérage des anomalies) tout en réalisant une seconde tâche de pilotage (un suivi de cible). Notre hypothèse est que la libération des ressources cognitives dû à la qualité de la composition graphique de *GestureView*, pourrait permettre d'améliorer la performance dans la tâche secondaire.

6.1 METHODE

L'évolution du projet *GestureView* s'étend de février 2019 à mai 2019. Il fait suite au précédent projet (cf. chapitre 5). Il se compose de trois temps forts : la conception d'un nouveau design inspiré des retours des pilotes (cf. 6.2), une session d'évaluation qualitative avec des équipages de pilotes professionnels (cf. 6.3 & 6.4) et une session d'évaluation quantitative avec des participants non-pilotes (cf. 6.5 & 6.6). La première session propose au pilote assis à gauche, d'occuper le rôle de Pilot Monitoring (PM), tandis que celui de droite devient le Pilot Flying (PF). Ce dernier dispose d'une tâche de tracking et de *GestureView*. Ensemble ils réalisent des scénarios de procédure aéronautique. Le PM agit sur un panneau tactile représentant un panneau de contrôle des systèmes avioniques. La seconde session est adaptée pour des non-pilotes. Ceux-ci sont co-organisés avec un collaborateur du projet qui occupe le rôle du PM assis à gauche. Le participant occupe le rôle de PF et doit effectuer une double-tâche (tâche de tracking et tâche de mémorisation d'items).

Le développement informatique (cf. 6.1.1) a été réalisé avec Aristé Thévenon (étudiant ingénieur en informatique à l'ENAC) dans le cadre d'un stage d'une durée de 80 heures (entre février et avril 2019). L'analyse des résultats quantitatifs (cf. 6.3.3) a été réalisée avec Anaïs Maurel (étudiante en M1 Ergonomie et Ingénierie du Mouvement Humain à l'Université d'Aix-Marseille) dans le cadre d'un stage de 2 mois (avril et mai 2019).

6.1.1 Description du système

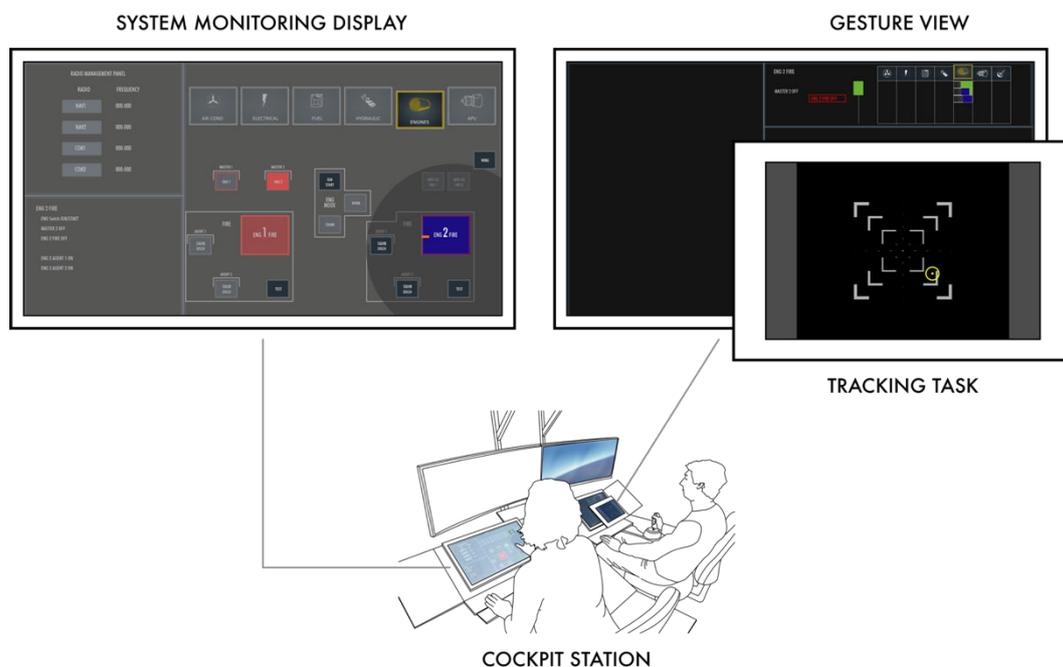


Figure 98. Dispositif de la version finale de *GestureView*

La configuration de la plateforme est la suivante. Chaque pilote est assis devant deux écrans (cf. Figure 98). Au premier plan, le premier écran est un écran tactile Dell 2240T (21,5p). A gauche, le pilote occupe le rôle de pilot monitoring et dispose d'un panneau de contrôle des systèmes avioniques (PSA). A droite, le pilote occupe le rôle de pilot flying et dispose de *GestureView* interactif. Au second plan, il y a deux écrans incurvés LG 34UC79G (34p) situé au-dessus des écrans tactiles. L'écran du PF affiche une vue extérieure de l'avion. Sur le siège droit, à la place du PF, il y a un manche de vol SPEEDLINK Dark Tornado qui permet au pilote de contrôler une tâche de suivi (tracking) affichée sur un écran tactile Wacom Cintiq Companion Hybrid (13,3p) disposé sous l'affichage de *GestureView*.

Le siège gauche occupé par le Pilot Monitoring

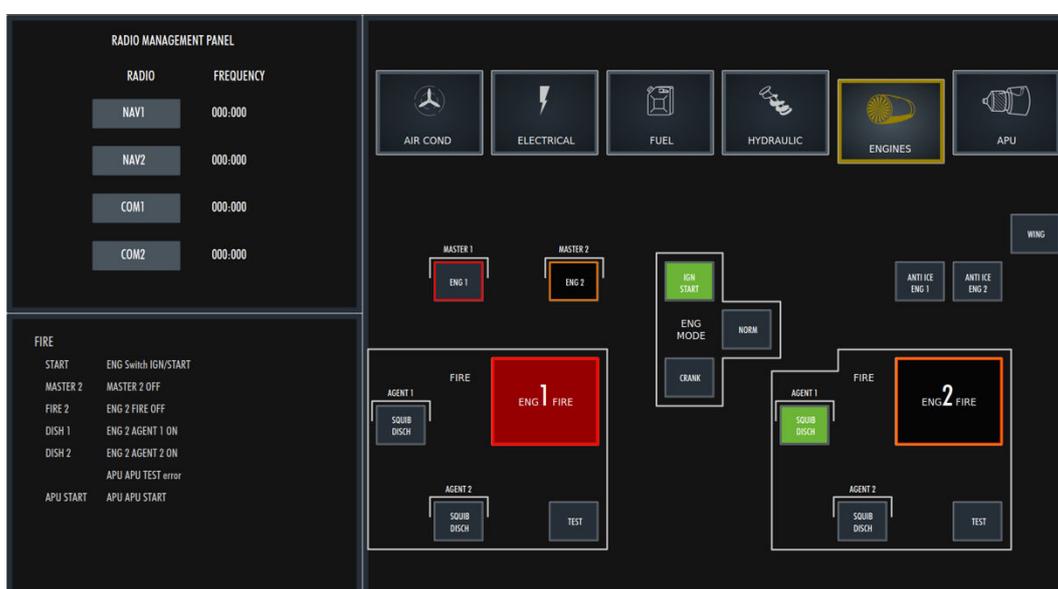


Figure 99. Vue du panneau de contrôle des systèmes avioniques. La page affichée est celle du système de gestion des moteurs. En haut à gauche, un panneau de gestion radio et en bas à gauche, un afficheur de checklist.

Sur le siège gauche, le pilote utilise un écran tactile qui comprend un panneau de contrôle des systèmes avioniques (PSA) inspiré du panneau supérieur actuel de l'A320 (Overhead Panel), un panneau de gestion radio et un espace d'affichage des checklists (cf. Figure 99). Six systèmes avioniques sont reproduits sur le PSA : Système de climatisation et système pneumatique (air bleed), système électrique (electrical), système de carburant (fuel), système hydraulique (hydraulic), moteurs et système d'incendie (engines), groupe auxiliaire de puissance (APU). Le panneau de gestion radio permet d'accéder à 4 fréquences (NAV1,

NAV2, COM1, COM2)¹⁶. L'interaction gestuelle est possible de trois manières en fonction de la criticité de l'action.

Description des gestes numériques

Les gestes numériques réalisables sur l'écran tactile du siège gauche s'inspirent des contraintes aéronautiques telles que les turbulences et la fatigue (A. Cockburn et al. 2019). Les 3 types de gestes effectués par le pilote correspondent à différents niveaux de criticité. En effet, il y a des actions sur des fonctions avioniques qui impliquent une plus grande vigilance de la part du pilote et qui doivent être obligatoirement partagées par l'équipage (e.g. couper un moteur est une action irréversible comportant de lourdes conséquences sur la sécurité de la mission du vol à l'inverse, par exemple, de l'allumage des phares). Les gestes comprennent : le Touch (To), le BraceTouch (BrTo), le TimeTouch (TiTo).

Touch (To)

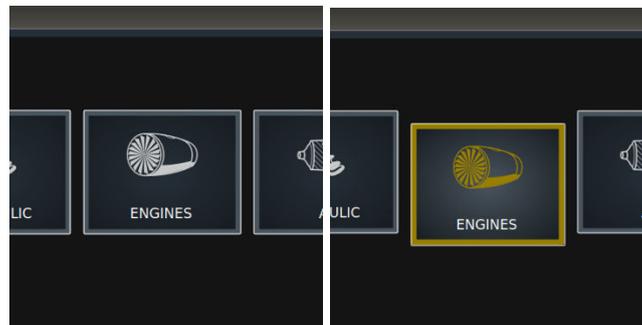


Figure 100. États du Touch. A gauche, état Idle, à droite état Pressed.

Voici le contact traditionnel sur l'écran. Nous l'avons associé à deux interactions : pour sélectionner un système et pour confirmer une action de cross-check sur *GestureView* (cf. Figure 100).

¹⁶ Le panneau de gestion de radio n'est pas opérationnel et n'a donc pas été présenté aux participants. Cependant, il a été intégré dès la conception graphique afin d'envisager une suite à ce travail. Nous décrivons cela dans la partie conclusion.

BraceTouch (BrTo)



Figure 101. États du BraceTouch. A gauche, état Idle, au milieu, état Pressed et à droite l'état Clicked.

BraceTouch s'inspire de la conception gestuelle développée (A. Cockburn et al. 2019) pour répondre aux problématiques de turbulence par rapport aux interactions tactiles. Le BraceTouch permet au pilote d'activer ou de désactiver une fonction de surveillance du système. Le geste est composé de deux étapes (cf. Figure 101). La première étape est un contact sur l'écran afin de sélectionner une fonction puis la seconde étape est la validation de la sélection par un double contact. La durée entre les contacts est inférieure à 500 ms. Lors de la première pression, une zone de confort apparaît sur l'écran tactile autour de la fonction sélectionnée. Ceci est représenté par un cercle avec une opacité de 80% pour ne cacher aucune fonction. Cette zone permet de reposer la main ou les doigts sans interagir sur d'autres fonctions, par exemple en cas de turbulence. Il fournit également un feedback sur le choix de la fonction. Pour annuler la sélection initiale, un contact doit être effectué en dehors de la zone de confort.

La machine à état est constituée de 3 états :

État	Description
Idle	On peut passer à l'état pressed en pressant le bouton.
Pressed	Le bouton a été pressé une première fois par l'utilisateur. Dans cet état, tous les autres boutons sont verrouillés. Deux zones apparaissent : un rectangle gris clair occupant toute la surface de l'écran et un cercle gris foncé légèrement excentré par rapport au bouton. L'utilisateur peut s'appuyer avec plusieurs doigts ou avec la paume de la main sur la zone circulaire sans activer d'autres boutons : il peut alors adopter une position plus robuste en cas de turbulences. Si l'utilisateur a sélectionné le mauvais bouton il peut revenir dans l'état idle en pressant la zone rectangulaire. Il peut aussi passer à l'état clicked en pressant deux fois consécutives (- de 500ms entre les deux contacts) le bouton : c'est un DoubleTouch.
Clicked	Le bouton est cliqué.

TimeTouch (TiTo)

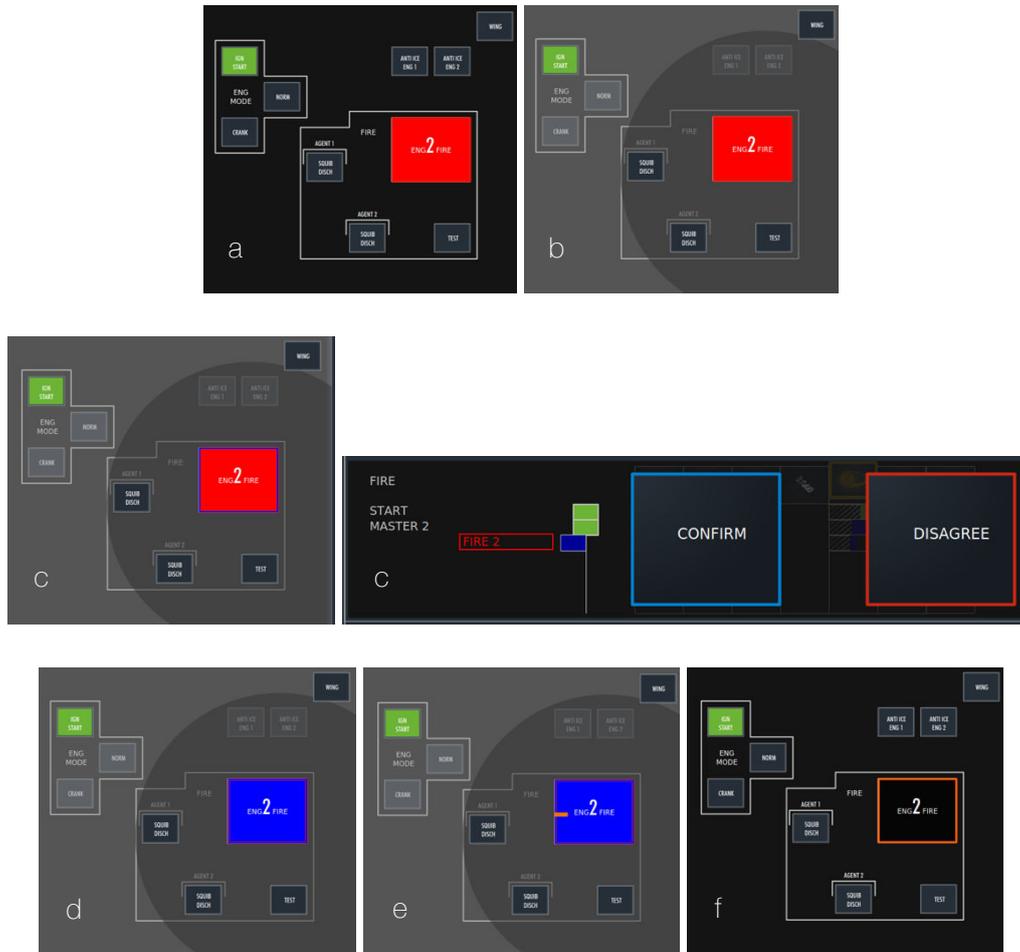


Figure 102. États du TimeTouch. (a) Idle, (b) Pressed, (c) Checked (Écran du PM à gauche et GestureView sur l'écran du PF à droite), (d) Crosschecked, (e) Running ou Waiting, (f) Clicked.

Lorsque le pilote souhaite activer une fonction critique comme l'arrêt d'un moteur, un geste de TimeTouch est nécessaire (cf. Figure 102). Cette action ajoute une troisième étape au BraceTouch. En plus de confirmer la sélection du pilote sur le panneau système, la deuxième étape du BraceTouch envoie un message de confirmation qui apparaît sur *GestureView*. Le pilote assis sur le siège droit doit alors choisir entre deux informations « confirm » ou « disagree » en effectuant un Touch sur l'option désirée qui permet au pilote assis à gauche de terminer son action. Il doit appliquer un contact continu sur la fonction sélectionnée pendant 3 secondes pour compléter le TimeTouch.

La machine à état est constituée de 7 états :

État	Description
Idle	On peut passer à l'état Pressed en pressant le bouton. Le bouton n'est pas accessible si la procédure en cours ne nécessite pas son activation.
Pressed	Cet état et les états suivants (hormis l'état Clicked) sont pourvus du même dispositif robuste que le BraceTouch : apparition d'un masque circulaire permettant de s'appuyer et d'un masque rectangulaire permettant de revenir à l'état Idle. On peut passer à l'état Checked en effectuant un DoubleTouch sur le bouton.
Checked	Envoie une notification au PF via le protocole Ivy. Le PF peut alors accepter ou refuser la demande. En cas de refus, le bouton retourne dans l'état Idle ; sinon on passe à l'état Crosschecked.
Crosschecked	L'utilisateur passe à l'état Running en maintenant son doigt sur le bouton.
Running	L'utilisateur doit presser le bouton pendant trois secondes pour l'activer (Long Press) : on passe à l'état Clicked. Lors de cette action, il peut relâcher le bouton (volontairement ou à cause de turbulences) : on passe alors à l'état Waiting.
Waiting	L'utilisateur peut de nouveau maintenir son doigt sur le bouton pour reprendre le Long Press : il passe alors à l'état running, puis à l'état Clicked lorsque le bouton aura été pressé pendant 3 secondes au total.
Clicked	Le bouton est cliqué.

Le siège droit occupé par le Pilot Flying

Sur le siège droit, le Pilote Flying dispose de *GestureView* pour contrôler les gestes du pilote assis à gauche. Il dispose également d'une application de tâche de suivi. Nous décrivons *GestureView* dans la prochaine section (cf. 6.1.2).

Tâche de suivi

Afin d'équilibrer les apports de *GestureView* pour une activité de pilotage, nous recréons une situation de vol écologique en demandant au PF d'effectuer une tâche de suivi inspirée de la NASA Multi-Attribute Task Battery (MATB-II) (Andy Cockburn et al. 2017) en plus de l'utilisation de *GestureView*. Le MATB-II est conçu pour recréer la charge cognitive nécessaire au pilotage d'un avion en exigeant simultanément la surveillance des systèmes, la gestion des ressources dynamiques, la prise en charge d'une tâche de suivi et la gestion des instructions radio. L'ajout de la tâche de suivi MATB-II à l'utilisation de la vue

GestureView nous permet de recréer les interruptions et surcharges cognitives inhérentes à une activité de pilotage.

La tâche de suivi consiste à garder un curseur au centre de la vue à l'aide d'un joystick pendant que la position du curseur se déplace. Le mouvement du curseur est défini selon un vecteur dont l'angle et la longueur sont définis aléatoirement dans une plage spécifique. Le choix de la gamme définit la complexité de la tâche : faible ou élevée. En fait, plus la plage d'angle est importante, plus le curseur semble se déplacer de façon aléatoire et plus la longueur est élevée, plus le curseur se déplace rapidement. Pour aller plus loin dans l'immersion en vol, nous avons lié le mouvement du joystick à un horizon artificiel, qui donne l'impression que l'avion se déplace en fonction du joystick. Deux niveaux de difficulté ont été déployés : faible et élevé.

Architecture logicielle

L'application principale est hébergée sur une machine Linux. Elle contrôle à la fois la communication entre les deux interfaces PM et PF (panneau système et *GestureView*) et la tâche de suivi et la vue extérieure simulée. Elle est développée en langage réactif *Smala* et utilise la librairie de programmation *Djnn*. Le système de tracking et l'horizon artificiel sont développés en *C#* et communiquent avec le système principal grâce au protocole *Ivy* qui permet la communication entre systèmes dans un réseau local. Ce système est hébergé sur une machine Windows. L'ensemble des interfaces graphiques (panneau de contrôle, cible de la tâche de tracking et *GestureView*) sont conçus sous forme de graphiques vectoriels évolutifs (SVG) avec *Adobe Illustrator CS6*.

6.1.2 Design : *GestureView*

Nous proposons un nouveau design pour *GestureView*. Les choix pris pour définir sa conception graphique sont tributaires des résultats émis lors de la présentation de huit design (cf. 5.4) devant des pilotes professionnels (cf. 5.5). Nous présenterons ces choix en deux temps. D'abord, nous décrirons les choix de composition graphique de *GestureView*. Nous résumerons les relations d'affichages entre l'interaction effectuée par le pilote monitoring (PM) sur le panneau de contrôle des systèmes avioniques et les représentations des effets des gestes sur *GestureView* positionné en face du pilote flying (PF). Ensuite, nous aborderons dans le détail nos choix d'affectation des variables graphiques avec les dimensions des gestes.

Description de *GestureView*

L'outil *GestureView* est affiché de manière fixe en partie supérieure haute à droite de l'écran. Elle est disposée au-dessus de l'affichage de la cible et en dessous de l'écran représentant l'environnement extérieur (cf. Figure 103). Dans le cas hypothétique d'une implémentation en condition réelle, ce choix de positionnement est motivé par le fait d'être présent dans le circuit visuel du pilote sans détourner la tête, à la fois lorsqu'il pilote avec l'instrumentation de bord fournissant des informations de pilotage nécessaire au vol assisté par les instruments

avioniques (IFR) avec le Primary Flight Display (PFD, cf. 1.1.2) mais également lors du pilotage en vol à vue (VFR) avec la vision sur l'environnement extérieur. Ce positionnement répond à un atout soulevé par les pilotes concernant le fait d'avoir en face de soi notre outil de suppléance et de ne plus avoir besoin de tourner la tête pour observer le geste numérique du co-pilote dans l'espace pour en avoir les informations : « Là déjà dans un premier temps je vois tout de suite ou est-ce qu'il a la main sans avoir besoin de forcément tourner la tête et peut-être de rentrer dans autre chose, euh donc c'est moins... ça m'interrompt moins puisque finalement je l'ai en face » (cf. 5.5.4).



Figure 103. Le design de *GestureView* avec la fenêtre de la tâche de suivi sur un autre écran.

GestureView est décomposé en trois espaces distincts. La partie de gauche (cf. A sur Figure 104) affiche la dimension d'identification permettant d'indiquer les fonctions actionnées par les gestes ainsi que la dénomination de la procédure engagée (e.g. « FIRE » cf. Figure 104). Au milieu figure une colonne composée de rectangle au contour blanc et indiquant le statut de l'action (cf. B sur Figure 104). En fonction de la complétude ou du statut de l'action, le rectangle apparait en décalage ou aligné aux autres objets graphiques composant la colonne. A droite (cf. C sur Figure 104), nous avons repris le principe du design 3 présentée lors du précédent travail (cf. 5.4). En effet, ce principe a été apprécié majoritairement par les pilotes professionnels pour trois principales raisons. Les pilotes ont d'abord apprécié l'accès direct à la dimension de la localisation, non pas vis-à-vis des coordonnées du geste dans l'espace mais plutôt via une information avionique sur le système engagée. Cette information fait converger les coordonnées du geste avec l'identification du système dans lequel la fonction avionique est manipulée. Cette composition permet d'obtenir deux chemins complémentaires pour lire la dimension de l'identification : avec un accès direct à la fonction en partie de gauche (A) ou bien d'après le système avionique en partie de droite (C). La deuxième raison de cette préférence est issue de l'appréciation des pilotes en faveur de l'idée de l'accumulation graphique des gestes ligne par ligne. Nous pensons que ce fait provient de la ressemblance de notre représentation avec la présentation actuelle des checklists sur les afficheurs avioniques (e.g. ECAM cf. 1.4.1). Enfin, c'est le design qui a reçu l'accueil le plus favorable pour afficher et discriminer les dimensions de temporalité,

d'identification, de complétude et de trace. Du fait de leur acceptation partagée par les pilotes, nous avons conservé la représentation des six principaux systèmes de gestion de l'avion (Air conditioning ou Air cond, Electrical, Fuel, Hyraulic, Engine, Auxiliary Power Unit ou APU) et nous avons ajouté le système de radiocommunication (présent à droite).



Figure 104. Trois parties sont présentés sur GestureView (A, B, C).

Au sein de la partie à droite (C), lorsqu'une action est réalisée sur une fonction avionique (en dehors de la sélection de la page d'un système), un rectangle apparaît contenant une information sur la dimension de la temporalité. Pour la représenter, nous avons utilisé la variable de grain du fait de sa qualité pré-attentive. En effet, d'après la *Sémiologie Graphique*, elle est particulièrement performante pour associer ou isoler des valeurs ordonnées (cf. 3.4.2). Nous avons dessiné plusieurs déclinaisons formelles avant d'en choisir une pour l'implémenter au *GestureView* (cf. Figure 105). En complément, nous avons ajouté la dimension du statut du geste avec la variable de couleur afin de favoriser la rapidité d'acquisition de l'information sur la complétude (vert pour signifier que l'information est traitée correctement par le système avionique et qu'elle correspond à ce qui est attendu par la procédure ; orange pour signifier une action non désirée par la procédure mais consciemment réalisée par le pilote, ce que les pilotes appellent un « open-item », ou encore une anomalie dans la prise en compte du geste par le système requérant l'attention des pilotes).

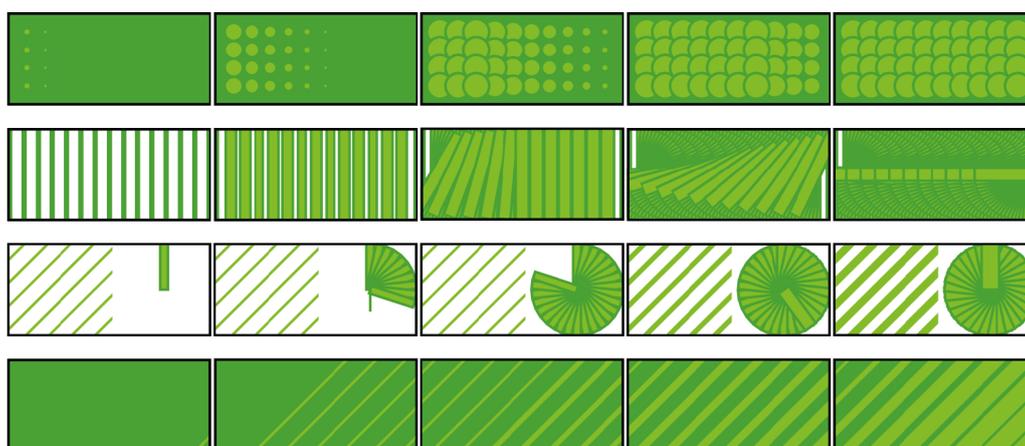


Figure 105. Quatre exemples de propositions graphiques pour signifier la durée d'un geste avec la variable de grain combinée à une animation temporelle.

Cependant, dans le but de faire converger le plus de dimensions possibles, nous avons estimé arbitrairement que ces quatre propositions de représentations ne permettaient pas d'intégrer la dimension de l'intention. En effet, pour rappel, il y a deux types d'intentions de geste (BraceTouch et TimeTouch). Nous avons imaginé une division progressive de la cellule d'après le type d'intention : 2 parties pour le BraceTouch et 3 parties pour le TimeTouch. Nous avons retenu une proposition où le grain reste fixe en fond et se dévoile en fonction de la durée du geste. La variation de couleur bleue indique la dimension de l'intention tandis que la variation de couleur verte (ou orange) indique la dimension du statut. La largeur du rectangle correspond au délai de l'action (e.g. la présence d'une large bande bleue signifie que le temps de cross-check a duré longtemps). Les différentes couches apparaissent selon le type de geste (le bleu implique obligatoirement un TimeTouch) (cf. Figure 106).

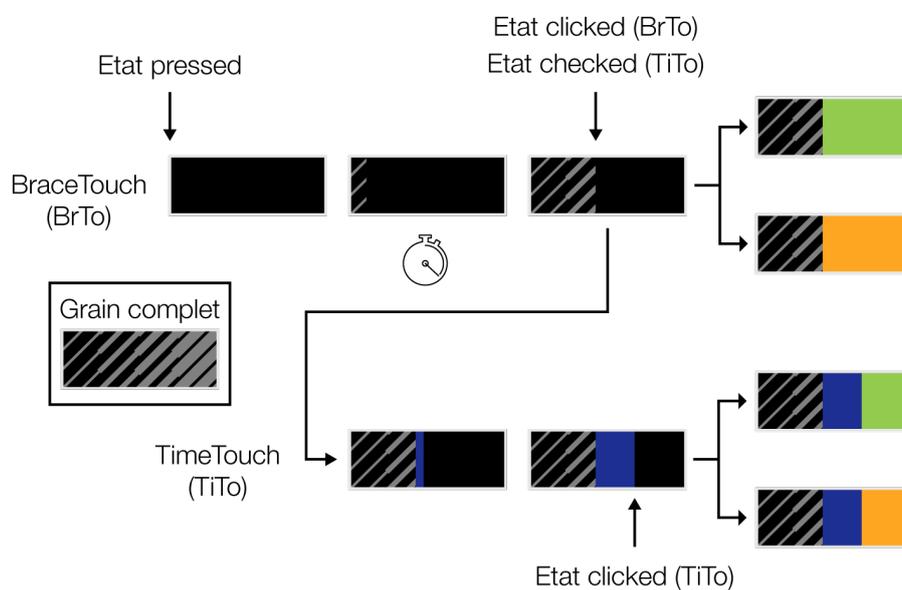


Figure 106. Fonctionnement des rectangles affichant les dimensions de la temporalité, de l'intention et du statut en fonction du type de geste.

6.2 ATELIERS

Deux séries d'ateliers ont été organisés. La première série a permis de recueillir des données qualitatives avec des équipages de pilotes professionnels. La seconde s'est déroulée chronologiquement après la fin de la première. Ces séances ont permis d'établir des données quantitatives d'utilisabilité de notre système graphique *GestureView*, notamment sur l'aspect pré-attentif.

6.2.1 Sessions d'évaluations qualitatives avec les pilotes

Participants

La population était composée de deux binômes de pilotes professionnels dont une équipe avec un instructeur spécialisée dans la formation du travail collaboratif. Comme pour la précédente étude (cf. 5.3.1) les pilotes étaient invités à réagir librement sur l'ensemble des aspects du design (graphiques, fonctionnement, statut, etc.) avant, pendant et après chaque scénario. Les séances ont été enregistrés (05h08) et entièrement retranscrites (82 pages) (cf. Figure 107).

Date	Durée (h.min)	Profil du/des pilote(s) Nombre de pilotes avec dénomination [x]; Grade; Compagnie; Qualification(s)
21/03/2019	2.35	1: [LJ]; First Officer; Volotea; A320 & [DG]; Ø; Ø; Instructeur CRM (ENAC) série A320
22/03/2019	2.33	2: [LSB]*; Ø; Ø; A320 & [VD]; Pilot-in-Command; Transavia; B737
SOMME	5.08	* Pilote sans emploi lors de la séance

Figure 107. Agenda des séances avec les pilotes.

Scénarios

Pour évaluer *GestureView*, nous avons conçu 3 scénarios basés sur trois situations impliquant un niveau de vigilance progressif. Tous les scénarios s'inspirent de la documentation technique de l'avion. Le scénario S1 (Engine Start Switch Anti-Ice On) est un scénario de dégivrage du moteur. Il s'agit d'une procédure nominale et répétée pour chaque vol lors des phases de décollage et d'approche notamment. Le pilote assis sur le siège gauche effectue 6 actions (4 BrTo et 2 To) sur un seul système. Le second scénario (S2) concerne la gestion de panne de la baisse de pression d'huile du générateur d'entraînement électrique intégré (IDG). C'est une procédure anormale et décrite par une checklist. Le scénario commence par alarme graphique sur l'écran de surveillance du système. Le pilote sur le siège gauche annonce le nom de la panne et sélectionne le système électrique pour arrêter l'alarme. Le pilote sur le siège gauche dit « IDG 1 disengaged », le pilote sur le siège droit répond « check » puis le premier pilote effectue un geste de TimeTouch pour désengager cette fonction. Ce scénario nécessite 6 actions manipulant 2 systèmes (3 To, 2 BrTo et 1 TiTo). Enfin le dernier scénario concerne la gestion de panne critique suite à un feu moteur (S3). Contrairement aux scénarios précédents, ce type de procédure est un memory items (les pilotes sont tenus de mémoriser les actions techniques sans suivre la *checklist*). La majorité des actions à effectuer lors de cette procédure implique une confirmation mutuelle. Le pilote assis à gauche réalise 7 actions sur le système moteur (2 To, 3 BrTo et 2 TiTo). L'usage de la parole est laissé libre par les pilotes. Néanmoins nous recommandons au début de chaque séance d'énoncer les gestes TiTo.

Chaque équipage a réalisé 2 fois la série de 3 scénarios dans une configuration de rôle, puis les rôles ont été changés et la série a été réalisée à nouveau 2 fois. La première série était destinée à l'apprentissage du dispositif. Au terme de chaque série, il était demandé à chaque pilote de réaliser à nouveau le troisième scénario sans contact visuel avec l'autre pilote. Pour cela, nous avons équipé la plateforme modulable d'un rideau isolant visuellement chaque pilote (cf. Figure 108).

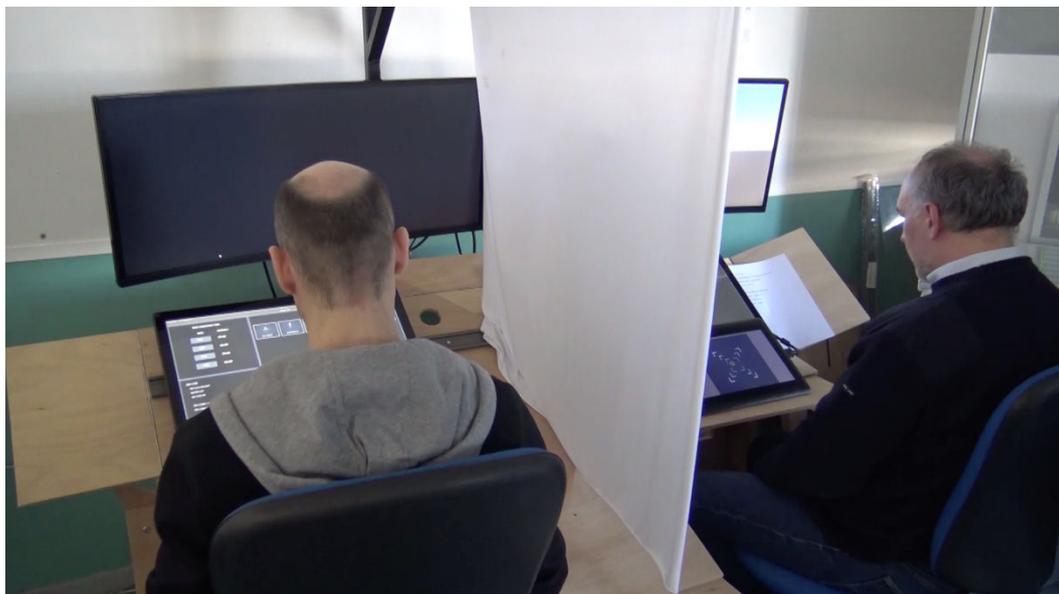


Figure 108. Scénario 3 joué avec un rideau.

6.2.2 Sessions d'évaluations quantitatives avec les utilisateurs non-experts

Participants

La population était composée de 12 participants, âgés de 22 à 60 ans (37 ans en moyenne), sans problème de vue non corrigée et ayant des notions en aéronautique. Les participants étaient invités afin de prendre le rôle du Pilot Flying (assis à droite). Le rôle du Pilot Monitoring était géré par un collaborateur du projet.

Scénarios

A l'inverse des scénarios avec les équipages composés de deux pilotes professionnels, il a été demandé à un collaborateur faisant partie du projet de jouer le rôle du pilot monitoring en place gauche, puisque chaque évaluation impliquait la présence d'un seul participant. Nous justifions le choix de ne pas avoir fait collaborer deux participants au sein de la même séance pour éviter la phase d'apprentissage relative à l'interface de gestion des systèmes avioniques. En effet, la principale ambition de cette séance avec des non-experts est d'évaluer la qualité pré-attentive de *GestureView*.

Tâche

Il était demandé à un collaborateur du projet occupant le rôle de pilot monitoring (PM) de réaliser une checklist sur le panneau de contrôle en place gauche. Simultanément, le participant assis en place droite et occupant le rôle de pilot flying (PF) avait une double tâche à effectuer. En tâche principale, il devait surveiller les agissements du collaborateur. Pour mesurer cela, il devait retenir l'enchaînement des fonctions sélectionnées par le PM. A la suite de la checklist réalisée, le PF devait énoncer les items sélectionnés par le PM, le nombre de systèmes parmi les 7 dans lesquels il était allé, et l'existence d'open-items (c'est-à-dire des actions non requises par la procédure). En tâche secondaire, il avait une tâche de suivi de cible à réaliser. Cette tâche consistait à replacer continuellement le point bougeant aléatoirement et à le maintenir au centre de la cible à l'aide du joystick.

Variables indépendantes

Il y avait deux conditions expérimentales avec deux modalités chacune. Les 2 conditions expérimentales étaient Avec *GestureView* (AGV) et Sans *GestureView* (SGV). Dans chacune des conditions, 2 types de checklist ont été réalisées. Le premier type était une checklist simple qui consistait à enchaîner 7 fonctions pour le PM. Le second type était une checklist avec une interaction entre le PM et le PF, c'est-à-dire un enchaînement comprenant une demande de confirmation à fournir par le PF. Au total, il y avait 4 scénarios, soit 4 *checklists* différentes (où seuls les noms des items différaient) pour éviter les biais de familiarisation que peut engendrer la répétition. Un scénario correspond au déroulement d'une checklist. Les scénarios correspondant à la condition AGV étaient S1 (checklist simple) et S3 (checklist avec interaction). Les scénarios correspondant à la condition SGV étaient S2 (checklist simple) et S4 (checklist avec interaction). D'après une étude de Wickens (1976), nous codons de manière sémantique dans notre mémoire à court-terme. Les enchaînements des items sélectionnés pour les checklists étaient donc groupés par système et faisaient parties du même champ lexical pour un même système. Le vocabulaire était aussi simplifié par rapport aux checklists des pilotes afin de ne pas mettre de barrière avec un langage aéronautique trop complexe. De plus, Miller (1956) a défini que nous étions capables de retenir 7 termes ± 2 . Ainsi, chaque checklist étaient composés de 7 items.

Variables dépendantes

Afin de mesurer l'état de conscience de la situation du pilote navigant, il a été relevé 3 éléments dans la mémorisation des checklists lors de sa tâche principale : le nombre d'items retenus, le nombre de systèmes touchés par la checklist que le participant a perçus, et la perception d'un open-item.

La tâche de tracking (replacement continu de la cible bougeant aléatoirement), considérée comme la tâche secondaire du PF était analysée pour mesurer la libération des ressources cognitives du pilote grâce à l'utilisation de *GestureView* dans sa tâche principale. La performance dans la tâche de tracking a donc été caractérisée par la distance du curseur à replacer par rapport au centre de la cible.

Une analyse statistique a ensuite été réalisée avec le logiciel R, sur les résultats obtenus dans la mémorisation des items des checklists, ainsi que sur la performance dans la tâche de tracking (se replacer en continu le plus près du centre de la cible).

Procédure générale

Chaque participant a d'abord réalisé une phase de familiarisation avec *GestureView* afin de pouvoir comprendre pleinement son fonctionnement. Le test a ensuite été composé de 2 fois 4 scénarios. Pour rappel, un scénario correspond au déroulement d'une checklist. Chaque scénario était différent. Tous les scénarios étaient réalisés dans un ordre randomisé. Ils ont été réalisés une première fois afin que les participants puissent avoir une phase d'apprentissage avec les termes des 4 checklists, tout comme un pilote qui connaîtrait déjà les checklists en temps normal.

6.3 RESULTATS

Nous décrivons les résultats en séparant la session avec les pilotes (cf. 6.3.1) et la session avec les utilisateurs non-experts (cf. 6.3.2). Pour chaque, des discussions sont énoncées.

6.3.1 Résultats avec les pilotes

Dans cette section, nous décrivons les connaissances acquises au cours des séances avec les pilotes professionnels. Notre intention est d'évaluer la qualité du dispositif proposé vis-à-vis de l'intérêt opérationnel pour améliorer la conscience mutuelle en situation d'interaction tactile. Nous avons adopté la même démarche d'analyse des résultats que pour la précédente étude (cf. chapitre 5). Tous les pilotes ont été anonymisés (P1, P2, etc.).

A Percevoir l'erreur « pré-attentivement » pour engager le dialogue

La majorité des pilotes assis à droite avec *GestureView* ont engagé la conversation dès lors qu'ils constataient une erreur de statut dans le geste du pilote assis à gauche : « Au début parce que je voyais qu'il était à l'aise en tapotant et puis tout d'un coup je me suis dit tiens c'est orange, ça devrait être vert si c'est dans l'ordre et puis c'est là qu'on a commencé à en parler » [P1]. Un pilote spécifie l'intérêt opérationnel pour engager le dialogue mais uniquement pendant l'action « l'information elle est bien en temps réel » [P3]. Le pilote identifie une incapacité d'agir, un blocage. Il explique : « Tu vas dire, tiens il ne bouge pas » et tu vas être interpellé. Et si tu vois qu'il est comme ça en train de baver là effectivement tu vas... mais une fois que c'est fait, ça va juste rendre plus difficile le visuel. » [P1]. L'utilisation de la variable graphique de couleur est évaluée performante par plusieurs pilotes « je suis dans mon pilotage, et je vois que tout passe vert, ça se passe bien » [P2] ainsi que l'utilisation de la loi de proximité de la Gestalt « c'est vrai que le fait que ce soit décalé et le changement de couleur... [P4] Ah ouais c'est bien hein ? » [P3]. Un pilote

apprécie la variable de la couleur mais propose une idée de conception concernant l'utilisation de la variable visuelle de clignotement : « Donc c'est vrai que de voir du coin de l'œil, donc je pense qu'un truc qui clignote ça se verrait tout de suite » [P4] cependant le second pilote de la séance est en désaccord et préfère la variable de couleur : « Je ne suis pas sûr que le clignotant soit pertinent » [P3]. Sans le prouver, la plupart des pilotes ont estimé avoir été capables de percevoir immédiatement les erreurs, évaluant qualitativement la pré-attentivité du système. A la question : Avez-vous perçu une ou plusieurs erreurs ? Un pilote a répondu « Ouais, tout de suite » [P2], un autre : « Ah oui... J'ai vu de suite qu'il y avait eu une erreur » [P3]. Même lorsque le niveau de complexité du joystick augmente, la perception de l'erreur est performante : « Ah ouais ça marche bien. Et pourtant je peux te dire que là je bataille (parlant du joystick). C'est pas mal ! » [P3].

B Les dimensions de temporalité et de trace

Comme pour la première expérimentation (cf. 5.5.3), la dimension de la temporalité et la dimension de la trace ont été largement commentées par les pilotes. Nous avons organisé ces dimensions d'après les deux effets des gestes présentée précédemment : *impression* et *résultat* (cf. chapitre 5). Pour rappel, l'effet d'*impression* correspond aux informations se déroulant durant l'action et traduisant la singularité des comportements gestuels tandis que l'effet du *résultat* renseigne sur la finalité du geste vis-à-vis du système avionique.

Dimension de temporalité nécessaire à l'impression

La représentation de la durée du geste a été apprécié par la majorité des pilotes : « Moi ça me parle, alors je n'y prête pas une importance, une grande importance du fait que la notion de timing sur la réalisation d'une tâche c'est complexe à expliquer, mais la fonctionnalité me semble importante dans le cas où il y a 2-3 procédures où le facteur temps est important » [P3]. Deux situations ont été présentées par les pilotes dans lesquelles la présence de la temporalité est utile. D'abord, cela permet de déceler un problème du co-pilote en apportant des informations au sujet de la singularité des gestes : « Ça peut être l'occasion pour moi de lui dire « qu'est-ce que tu fous ? ». Peut-être qu'il a une incapacitation. Ça c'est un bon moyen pour détecter tu vois une incapacitation » [P1]. Ensuite, il y a des situations qui requièrent de la part du système avionique des contraintes temporelles : « Alors effectivement dans des tâches où il y a une notion de temps, par exemple les extincteurs moteurs. Tu ne peux pas percuter, tu ne dois pas percuter les deux extincteurs moteurs à moins de 30 secondes après le premier, en fait ça peut permettre d'avoir cette notion de timer » [P3]. Un pilote souligne le besoin d'avoir cette dimension en cas de situation « critique ». Sans être dans la même séance, un autre pilote a proposé une idée de conception pour signifier un geste trop long : « Moi je pense à la fin un flashing quoi » [P1]. Enfin, deux pilotes ont estimé que la perception de la temporalité du geste ne devrait être affichée que durant l'action : « Oui, alors j'ai envie de dire ça (au sujet de la dimension de temporalité) ça peut être pas mal pendant qu'il

fait l'action. Par contre d'avoir la mémoire de : il a mis longtemps, plus ou moins... ça embrouille » [P1]. En effet, une fois que l'action est terminée, ils préfèrent avoir uniquement la dimension du statut remplissant l'ensemble du rectangle pour avoir une vision de complétude : « Ouais dire qu'à la fin on y est arrivé donc c'est bon, c'est vert. Et la temporalité on s'en fout parce que c'est derrière » [P1]. Tandis que deux pilotes ont estimé au contraire que conserver une trace de la temporalité pouvait être utile pour faire une analyse postérieure : « Moi ça me paraîtrait intéressant de le garder comme ça justement (la dimension de temporalité). Ne serait-ce que pour jeter un coup d'œil à la fin, même s'il ne s'est rien passé d'extraordinaire » [P4]. Enfin, un pilote a proposé une idée de conception pour enrichir la variable de grain. Il suggère d'associer la différence de grain à la criticité de l'action : « Et tu vois, dès que l'action est lancée, hop (imite l'animation de temporalité), ah tiens ça va être une action lourde, on voit qu'il va y avoir beaucoup de choses donc... et quand l'action lourde est longue, tu te mets un peu plus en mode « je vais un peu plus surveiller l'autre » parce que des fois y'a des arborescences « menace présente : oui/ non » tu vois » [P3]. Un pilote a apprécié la variable de grain pour signifier la durée de l'action : « C'est hyper sobre, t'arrive à donner une grosse richesse d'informations, je suis même assez surpris » [P3].

Dimension de la trace nécessaire au résultat

Lorsque l'action est terminée, deux pilotes ont considéré que l'information avionique devait prendre le pas sur l'effet d'impression. Ils considèrent que la dimension de temporalité du geste n'a plus d'intérêt opérationnel : « Au niveau interprétation, ça me prend beaucoup de ressource de dire « là il a mis tant de temps, là il a mis longtemps » mais je m'en fous qu'il est mis longtemps, tu vois. Moi ce que je veux c'est que quand l'action elle est faite, elle est pleine » [P1]. Tandis que deux autres pilotes ont estimé à l'inverse qu'avoir une trace de la singularité des gestes après le flot gestuel pouvait aider à mieux comprendre la situation lors du débriefing : « Surtout qu'après avoir fait des actions comme ça dans une panne, tu as un bilan à faire. Analyse, bilan-décision. Dans le bilan, il peut être intéressant de faire un review de la procédure » [P3]. En complément, un pilote identifie un intérêt opérationnel à la présence de la trace : « Parce que si y'a un truc qui ne marche pas, tu vas te dire « qu'est-ce que j'ai fait de pas bien ? », et là au moins t'as un récap » [P3]. Les pilotes ont apprécié la disposition des gestes par rapport aux sous-systèmes puisqu'ils pouvaient identifier rapidement la cohérence des actions : « L'action est faite, tu viens vérifier que le système (sous-système) l'a bien digéré. Tu sais que normalement c'est fait, et tu vérifies que tout est cohérent » [P4]. Un pilote commente la rapidité d'acquisition de l'information entre les sous-systèmes : « Quand c'est quelque chose d'important, ou quand tu veux passer à la suivante... Quand t'en as besoin ouais. Et ce qui est bien c'est que c'est accessible et lisible d'un simple coup d'œil. Tu vois la dernière action, tu l'as tout de suite sous les yeux... C'est succès, tu peux juste jeter un petit coup d'œil et accéder où tu veux, sans perdre d'énergie, de ressource... Non mais c'est bien » [P4]. Enfin, la notion de déroulement est commentée positivement par l'ensemble des pilotes puisqu'elle illustre

facilement l'évolution d'un flot procédural : « c'est sans doute parce que je m'habitue... mais ça déroule quoi, ça se passe bien » [P2]. Un pilote commente cela : « Oui, en fait j'ai plus cherché à avoir une progression graphique, plutôt que de la lecture de symbole » [P1].

C Suppléer le geste, un concept accepté par les pilotes

Le principe d'afficher une suppléance des gestes numériques par un outil graphique a été apprécié par tous les pilotes. Un pilote mentionne le problème de percevoir les gestes opérés sur la surface de son collègue : « Alors là, voir ce qu'il fait là-bas... C'est comme regarder ce qu'il fait sur son téléphone » [P4]. Un pilote commente la confiance qu'il a avec *GestureView* : « Ah oui, mais j'ai assez confiance en ce système » [P3]. Un autre pilote mentionne l'importance du dispositif lors de situation en contexte dégradé : « Ça me paraît être une bonne idée ouais de mettre de l'information dans le circuit visuel sans que le PF ait à tourner la tête plusieurs fois [...] Plutôt que justement d'aller lever le nez au plafond ou baisser en bas à gauche tu vois et puis avec Coriolis [force de Coriolis] tu fais ça, tu es dans les nuages, tu es fatigué » [P1]. Dans le premier atelier, un bug d'affichage est intervenu ponctuellement. Lors de certaines actions, les dénominations des fonctions ne se sont pas affichées. Ce problème d'affichage involontaire nous a permis de discuter de l'importance de la dimension d'identification. Un pilote commente à l'issue du scénario sans savoir que c'est un bug « tant que c'est vert c'est bon, dès que c'est orange ça ne va pas. Mais je n'ai pas commencé à réfléchir avant. Donc tout d'un coup je me retrouve dans une situation où... tu vois... et là on va commencer à perdre du temps parce que « attends il va fallait commencer par quoi, c'est quoi la procédure » tu vois » [P1]. La conversation a montré qu'il est essentiel d'afficher l'information désignant la fonction, ce que nous avons appelé la dimension de l'identification, parce qu'elle permet aux pilotes d'avoir une expertise sur l'état du système avionique, de l'avion : « il faut qu'on soit devant l'avion tout le temps » [P1]. Sans cette dimension, la représentation des autres dimensions devient superflue et inadaptée aux besoins opérationnels de pilotage. Enfin, la perception pré-attentive a régulièrement été mentionnée comme avec ce pilote : « Le fait de voir que tout est cohérent graphiquement, de jeter un œil et voir que le 1 c'est bien l'agent 1... La disponibilité pour lire aussi c'est direct comme info. J'y accède rapidement d'un coup d'œil... Donc c'est fonctionnel » [P4]. Un autre pilote mentionne ce fait en comparant les deux niveaux de complexité de la tâche de pilotage : « non le petit coup d'œil ça se fait pareil. Ça ne change pas grand-chose [par rapport au premier niveau du joystick] » [P2].

D Accentuer la complétude

En accord avec la mise en avant de l'erreur par la notion de décalage, les pilotes ont apprécié l'utilisation de la notion d'alignement pour représenter la complétude : « Enfin surtout ce qu'il m'intéresse c'est ça [...] c'est aligné et tout est fait » [P3]. Un pilote a apprécié le décalage des pictogrammes pour indiquer si le pilote est toujours dans une page de gestion d'un sous-système : « Là juste par abstraction,

moi je voyais qu'il avait terminé, parce que finalement il quittait la page » [P3]. Cependant, ce même pilote a trouvé plus tôt dans la séance qu'il manquait un objet graphique pour accentuer la complétude, notamment lorsqu'il y a des actions non requises par le système mais évaluées nécessaire par l'équipage : « Oui c'est vrai qu'il manque un petit enrichissement graphique qui montre que la fin de la procédure s'arrête effectivement ici, que c'est vraiment le dernier item. Un truc pour dire : c'est le dernier item. Pas juste remplir la colonne. Ou un « complete » qui s'affiche [...] (parce que) t'es peut-être pas à l'abri, que pour une raison x ou y, tu fais ta procédure, mais qu'il y ait une action en plus de faite, car le gars sait que. Donc c'est là qu'il faut que tu sois rigide » [P3]. Il a proposé des idées de design : « tu peux juste mettre un « complete » ou un « check » à l'américaine » [P3].

6.3.2 Discussion avec les pilotes

L'étude confirme l'intérêt de *GestureView* comme outil de suppléance pour améliorer la conscience mutuelle lorsqu'il y a des interactions tactiles, notamment en situation dégradée. En accord avec la précédente étude (cf. 5.6), les équipages de pilotes ont confirmé la pertinence de ne pas représenter les gestes des pilotes d'après leurs morphologies. En effet, du fait de la convergence entre les dimensions des gestes (comprenant la somme des effets traduisant de « l'impression » et du « résultat ») et les informations avioniques (e.g. identifier le système où la fonction est engagée), la dimension de la localisation basée sur les coordonnées de la main dans l'espace ne relève d'aucun intérêt opérationnel. Ce constat est apparu plus fortement lors des scénarios comportant la présence d'un rideau dont l'objectif était d'empêcher l'accès visuel entre les deux pilotes. En effet, tous les pilotes disposant de *GestureView* ont déclaré avoir compris les gestes produits par leur co-pilote et leurs localisations « par rapport aux systèmes ». L'étude a montré la nécessité de *GestureView* pour percevoir les erreurs autant dans la complétude que dans le statut des gestes notamment vis-à-vis du balayage visuel focalisé en face et donc en cohérence avec la tâche de pilotage du pilot flying. La conception graphique et la qualité pré-attentive du dispositif ont été appréciées conformément aux précédents résultats (cf. 5.6).

Par ailleurs, grâce à un bug, nous avons pu analyser l'importance de la dimension de l'identification. Si son affichage n'est pas respecté, il semble que la visualisation des autres dimensions du geste apparaisse comme secondaire, voir inutile. D'une part, ce fait confirme la nécessité d'avoir un outil de suppléance puisque les pilotes ont confirmé le problème de connaître les fonctions engagées en regardant directement les gestes numériques opérant sur une interface tactile (pour rappel, ces gestes ont été conçus pour être adaptés à des conditions de turbulence). D'autre part, ce constat nous amène paradoxalement à nous interroger sur l'importance d'avoir une représentation des gestes en continue dans le poste de pilotage. Par exemple, à la vue des résultats, nous faisons l'hypothèse que la dimension de la temporalité pourrait être affichée uniquement « pendant » les flots procéduraux. En particulier, lorsque les fonctions engagées requièrent une contrainte temporelle (e.g. attendre 30 sec avant de déclencher les extincteurs d'un moteur).

6.3.3 Résultats avec les utilisateurs non-experts

Dans cette section, nous décrivons les résultats produits au cours des séances avec les utilisateurs non-experts. Pour rappel, chaque participant était assis en place droite, occupant le rôle du Pilot Flying. En place gauche, un collaborateur du projet a joué le rôle du Pilot Monitoring en interagissant sur le panneau de contrôle tactile.

A Tâche principale : La mémorisation des checklists

Le nombre d'items

Les scénarios avec *GestureView* (GV) présentent une plus grande rétention d'items sur les 7, comparé aux scénarios réalisés sans GV (cf. Figure 109). En effet, lors des scénarios S2 et S4, seulement 2,3 et 2,4 items ont été retenus sur les 7 contenus dans la checklist, contre 5,6 et 5,8, pour les scénarios S1 et S3 qui ont été réalisés avec *GestureView*.

La moyenne du nombre d'items énoncés par scénario. S1 (checklist simple) et S3 (checklist avec interaction) correspondent à la condition avec GV (AGV). S2 (checklist simple) et S4 (checklist avec interaction) correspondent à la condition sans GV (SGV).

Nombre d'items énoncés (/7)	
S1	5,6 ± 1,3
S2	2,4 ± 1,2 **
S3	5,8 ± 1,3
S4	2,3 ± 1,3 **

Figure 109. Nombre d'items énoncés,
**, p-value < 0.01. S2 est comparé à S1, S4 est comparé à S3 avec un test de Wilcoxon sur données non-paramétriques (ne suivaient pas une loi normale).

Le nombre de systèmes

Lorsque les checklists étaient de type simple, les participants ont réussi à reconnaître plus de systèmes différents (sur les 3) dans les scénarios en condition avec *GestureView* (AGV) par comparaison avec les scénarios réalisés en condition sans GV (SGV) (cf. Figure 110). En effet, lors du scénario S1, ils ont retenu en moyenne 2,8 systèmes sur 3 contre 2,6 pour le S2. Lorsque les checklists étaient de type avec interaction, il n'y a pas eu de différence entre les scénarios S3 (AGV) et S4 (SGV).

La moyenne du nombre d'items énoncés par scénario. S1 (checklist simple) et S3 (checklist avec interaction) correspondent à la condition avec GV (AGV). S2 (checklist simple) et S4 (checklist avec interaction) correspondent à la condition sans GV (SGV).

Nombre de systèmes énoncés	
S1 (/3)	2,8 ± 0,5
S2 (/3)	2,6 ± 0,7
S3 (/2)	1,9 ± 0,3
S4 (/2)	1,9 ± 0,3

Figure 110. Nombre de systèmes énoncés.

Perception des Open-items

Les scénarios avec *GestureView* (GV) présentent une meilleure réussite dans la reconnaissance des open-items (c'est-à-dire des items non requis par la procédure). Lors de S1 et S3 (condition AGV), les 12 participants ont réussi à voir s'il y avait un open-item ou non. Lors de la condition SGV, 1 participant sur les 12 a échoué à percevoir l'open-item dans le scénario 2. Dans le scénario 4, 2 participants sur les 12 ont échoué et n'ont pas perçu s'il y avait un open-item.

B Tâche secondaire : La performance dans la tâche de tracking

L'étendue des distances recueillies indique que lors des scénarios S2 et S4 réalisés en condition SGV, les participants s'éloignaient plus loin du centre de la cible, par comparaison avec les scénarios S1 et S3 réalisés en condition AGV. En effet, en condition SGV, les valeurs adjacentes supérieures se situent à 1,39 (unités) pour S2 et 1,21 (unités) pour S4, contre 0,91 (unités) pour les 2 conditions AGV. De plus, en condition AGV, l'écart interquartile est plus faible (0,27 pour S1 et 0,28 pour S3) qu'en condition SGV (0,47 pour S2 et 0,39 pour S4) (Figure 4).

En moyenne, pour la réalisation d'une checklist simple en condition AGV (S1), les participants ont maintenu le curseur à une distance de 0,40 (unités) du centre, contre 0,55 (unités) pour une checklist du même type en condition SGV (S2). Aussi, pour la réalisation d'une checklist avec interaction en condition AGV (S3), les participants ont maintenu le curseur à une distance moyenne de 0,39 (unités) du centre, contre 0,47 (unités) pour une checklist du même type en condition SGV (S4) (cf. Figure 111). La boîte à moustache des distances au centre en fonction des scénarios montre S1 (checklist simple) et S3 (checklist avec interaction) avec la condition avec GV (AGV). S2 (checklist simple) et S4 (checklist avec interaction) avec la condition sans GV (SGV).

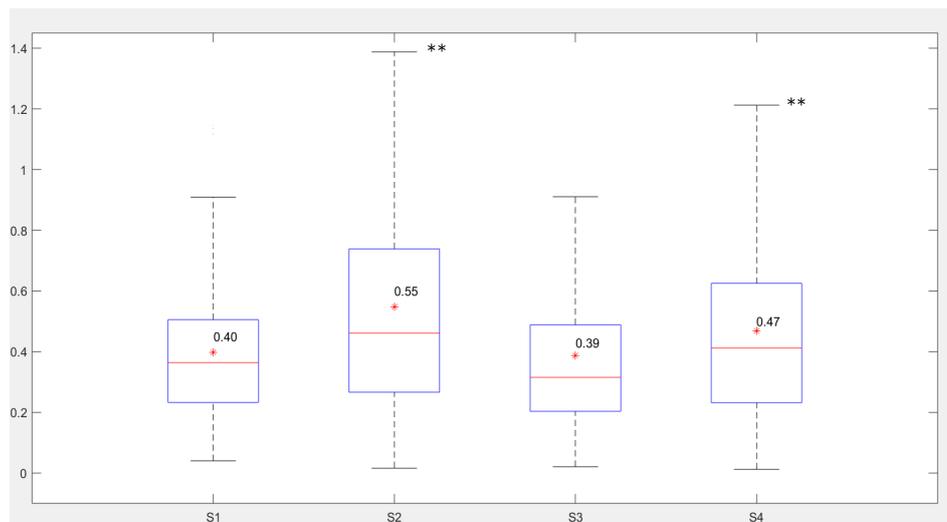


Figure 111. Boîte à moustache montrant l'écart des distances au centre, en fonction des scénarios **, p-value < 0.05. S2 est comparé à S1 et S4 est comparé à S3, avec un t-test apparié sur données paramétriques.

6.3.4 Discussion avec les utilisateurs non-experts

Une première étude qualitative avait confirmé les bénéfices de l'utilisation de *GestureView*. Cette seconde étude, destinée à obtenir des données quantitatives sur le bénéfice de *GestureView*, s'est tournée vers la notion de performance avec le principe de la double-tâche (avec et sans l'aide du GV). L'hypothèse était que la libération des ressources cognitives due à la qualité de la composition graphique de *GestureView*, permettrait une meilleure performance dans la tâche secondaire, laquelle était une tâche de tracking où le pilote devait replacer, au centre d'une cible, un curseur bougeant aléatoirement.

La tâche principale, où le participant devait s'assurer une conscience mutuelle, a été mesurée en lui demandant de mémoriser les noms des items sélectionnés, les systèmes et l'existence d'open-items. Les résultats sur le nombre d'items énoncés ont montré que le nombre d'items énoncés était significativement supérieur lors de la condition avec

GestureView, contrairement à la condition sans *GestureView*, que ce soit lors d'une checklist simple ou d'une checklist avec interaction. Aussi, les résultats sur le nombre de systèmes présentent une différence non significative en faveur de la condition AGV lorsque les checklists étaient de type simple (S1 et S2). Il n'y a pas de différence lors de checklist avec interaction puisqu'il n'y avait que 2 systèmes à percevoir, contre 3 lors d'une checklist simple, ce qui a pu faciliter la tâche des participants. Enfin, les résultats sur la perception de l'open-items (pour rappel : un item non-requis dans la checklist) indiquent que lorsque la tâche devait être réalisée dans la condition avec *GestureView*, les participants ont à chaque fois réussi à percevoir la présence de l'open-item. Or, lorsque la condition était sans *GestureView*, 1 participant sur les 12 a échoué sur le scénario 2 et 2 participants sur les 12 ont échoué lors du scénario 4.

Dans les 3 sous-tâches de la tâche principale, il y a donc une meilleure réussite pour la condition AGV, réalisée avec *GestureView*.

Lors de la tâche secondaire, où le pilote devait replacer au centre d'une cible un curseur bougeant aléatoirement, les résultats révèlent une meilleure performance significative lors de la condition avec *GestureView*. En effet, l'étendue des données et l'écart interquartile indiquent une plus grande variabilité et un éloignement plus fréquent du centre en condition sans *GestureView*. De plus, lorsque nous nous intéressons à la moyenne, nous pouvons voir que les participants ont réussi à maintenir le curseur à une distance plus proche du centre lorsqu'ils étaient dans la condition avec *GestureView*, que ce soit lors d'une checklist de type simple ou avec interaction, en comparaison avec la condition sans *GestureView*.

Ainsi, les résultats de la tâche principale et ceux de la tâche secondaire tendent à confirmer les bénéfices de *GestureView*. Lors de la tâche principale, les participants ont eu des meilleurs résultats sur les 3 éléments demandés après la réalisation de la checklist : l'énonciation des items, le nombre de systèmes et la perception d'un open-item. De plus, d'après le principe de la double tâche, les dégradations dans la performance de la tâche secondaire rendent compte des ressources nécessaires à la réalisation de la tâche principale. Ici, les performances dans la tâche secondaire sont significativement meilleures dans la condition avec *GestureView*. Ceci signifie que l'utilisation de *GestureView* permet de libérer de la ressource cognitive pour permettre une meilleure performance dans la tâche de tracking.

6.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté une version évoluée de *GestureView* à des équipages de pilotes professionnels et à des participants non-experts. A l'inverse des précédents designs (cf. chapitre 5), *GestureView* inclut une variété d'interactions (Touch, BraceTouch et TimeTouch) conçus en adéquation avec les contraintes de turbulence. La conception graphique de cette version de *GestureView* constitue une synthèse des bonnes propriétés émises lors des précédents ateliers (cf. 5.5) cependant, les résultats des pilotes montrent qu'elle peut encore être développée pour accentuer la dimension de la complétude et envisager l'apparition de la dimension de la temporalité uniquement pendant

le déroulement des flots procéduraux. Par ailleurs, les pilotes ont validé une fois encore l'intérêt d'avoir *GestureView* dans le poste de pilotage par rapport aux contraintes soulevées par les interfaces tactiles. La deuxième évaluation menée avec des utilisateurs non-experts a permis d'évaluer la qualité pré-attentive de *GestureView*. Bien que les pilotes aient qualitativement apprécié la rapidité dans l'acquisition des informations affichées, l'étude quantitative vient confirmer ce constat. Les utilisateurs ont réussi à obtenir de meilleurs résultats dans l'exécution de la tâche secondaire (suivi d'une cible) avec *GestureView*. Par ailleurs, les résultats montrent que son utilisation favorise une meilleure conscience de la situation. Dans les travaux futurs, il serait intéressant d'intégrer *GestureView* à l'ensemble des instruments avioniques afin de l'évaluer en condition de simulateur.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le travail réalisé pendant cette thèse avait pour ambition d'apporter une solution de suppléance des gestes numériques, réalisés par les pilotes, sur les écrans tactiles pour améliorer la conscience mutuelle dans les postes de pilotage des avions de ligne. Pour construire cette solution, nous avons structuré notre travail autour de deux questions de recherche :

Quelles sont les dimensions (informations critiques) constitutives des gestes qui participent à la conscience mutuelle ?

Comment une représentation peut-elle restituer pré-attentivement la conscience mutuelle transmise par les dimensions des gestes numériques ?

Dans le dessein de contextualiser ces questions de recherche, nous avons commencé ce manuscrit en présentant une analyse de l'activité de pilotage des avions de ligne. Cette analyse a été réalisée à partir de la littérature scientifique et des séances d'observations accompagnées d'entretiens avec des pilotes professionnels. Nous avons identifié quatre aspects principaux : la distribution des tâches pour assurer le fonctionnement de l'activité de pilotage, l'importance de la pré-attentivité pour accéder aux informations dans l'organisation de la conscience de la situation, l'intérêt des gestes pour assurer la conscience mutuelle et enfin les avantages et les risques associés aux écrans tactiles dans les postes de pilotage. Cette analyse de l'activité nous a permis d'acquérir un vocabulaire et une culture aéronautique nécessaires à la construction de notre travail de recherche. En effet, ces connaissances nous ont été indispensables pour comprendre les discours des pilotes, leurs métiers, mais également pour proposer des solutions adaptées à leurs besoins. Par ailleurs, cette analyse a montré d'un point de vue théorique, l'intérêt de mettre en place un outil de suppléance, en cas d'interaction tactile, pour assurer la conscience mutuelle entre les pilotes.

Pour répondre à la première question de recherche relative à l'identification des dimensions des gestes participants à la conscience mutuelle, nous avons en premier lieu été confrontés à la complexité de compréhension des gestes. Bien que nous eussions initialement dans ce travail de recherche observé les gestes des pilotes, il est rapidement apparu à nos dépens qu'il était très complexe de délimiter les critères de notre sujet à observer compte tenu de la grande variété des définitions attribuées aux gestes. En effet, qu'ils soient numériques ou physiques (associés à la matérialité du corps humain), les gestes sont des entités qui ne

possèdent pas de définition universelle. Ils sont déterminés par rapport aux réalités technologiques et culturelles dans lesquelles ils sont utilisés. C'est pourquoi, afin de nous aider à identifier les dimensions utiles à la conscience mutuelle, nous avons d'abord établi une première version d'un cadre des dimensions dans lequel les gestes pouvaient être représentés. Dans un premier temps, ces dimensions décrivaient les gestes numériques indépendamment de leurs rapports à la conscience mutuelle. Pour construire notre représentation, nous avons mené un état de l'art en deux temps : le premier orienté vers des définitions implicites, où les contraintes technologiques et d'utilisabilité des dispositifs informatiques conduisaient à définir par déduction des cadres de définition des gestes numériques ; le second orienté vers des définitions explicites. Celles-ci se sont construites au regard des précédents travaux menés pour aider les concepteurs à concevoir leurs interactions gestuelles. C'est en organisant les caractéristiques présentées par ces définitions autour de huit dimensions (modalité d'entrée, modalité de sortie, identification, coordonnées, temporalité, mouvement, statut, fonction) que la première version de ce cadre a pu être produite. Ensuite, l'analyse de la dimension concernant la fonction nous a conduits à aborder l'aspect comportemental des gestes par rapport aux individus, en étudiant plusieurs articles et livres de la littérature des sciences humaines et sociales. Ces lectures nous ont permis de comprendre le fonctionnement théorique des gestes par rapport à la technique (e.g. l'apprentissage des processus opératoires, dextérité). Enfin, nous avons mené une étude descriptive des gestes des pilotes dans les postes de pilotage des avions de ligne. Cette étude a analysé principalement des gestes physiques, c'est-à-dire des gestes agissant sur des contrôleurs physiques disposés sur les surfaces avioniques. En effet, notre intention était d'identifier les dimensions performantes des gestes, dans un environnement ayant fait état de sa qualité opérationnelle vis-à-vis de la conscience mutuelle. Cette étude a permis de compléter ou de spécifier le cadre de dimensions des gestes numériques (identification, localisation, temporalité, mouvement, statut, intention, trace, rôle, complétude) et d'enlever les dimensions non pertinentes pour la conscience mutuelle (modalité d'entrée et modalité de sortie). Ce travail constitue la première étape de notre travail de recherche.

Avec l'aide de nos travaux de représentation, nous avons évalué, au cours d'ateliers de conceptions participatives avec des pilotes, ces dimensions pour apporter des éléments de réponse à la question de recherche sur l'identification des dimensions utiles à la conscience mutuelle. Nous en retenons trois principaux :

- Avec l'interaction sur un écran tactile, la représentation de la dimension de la localisation par rapport aux coordonnées des gestes n'a pas d'intérêt pour la conscience mutuelle. En effet, l'emplacement du point de contact sur l'écran tactile n'est pas une information pertinente pour le co-pilote. Par contre, représenter la dimension de la localisation vis-à-vis du système dans lequel le geste engage une fonction s'avère être une solution appréciée des pilotes. En accord avec ce constat, il n'est pas intéressant pour la conscience mutuelle de représenter la dimension du mouvement d'après les coordonnées des gestes mais plutôt leurs déplacements entre les systèmes avioniques.

- En cohérence avec le concept de convergence des fonctions, les représentations des dimensions peuvent être catégorisé en deux types d'effets des gestes en fonction des situations rencontrées lors du vol et de leurs perceptions à un instant t : les *impressions* et les *résultats*. Les effets sur les *impressions*, renseignent sur la singularité des gestes, c'est-à-dire sur des éléments subjectifs et perceptifs comme la régularité, l'erreur, la réflexion ou encore les hésitations. Les effets sur les *résultats*, contiennent des retours d'informations avioniques. Une dimension peut d'abord représenter un effet d'*impression* puis un effet de *résultat* (e.g. la localisation, dans le cas où le pilote navigue dans plusieurs systèmes avant d'en choisir un. Le fait qu'il hésite traduit un effet d'*impression* puis une fois son choix fait, cette dimension devient un effet de *résultat* puisque l'action est terminée en indiquant une information avionique). Notre travail de recherche montre que le principe de convergence des fonctions est pertinent pour la représentation des gestes car il permet d'afficher les dimensions utiles à la conscience mutuelle selon la situation.

- Enfin, le dernier point concerne la variabilité d'intérêt pour afficher certaines dimensions. En effet, les résultats de l'ensemble de nos évaluations qualitatives menées avec des pilotes montrent qu'il n'est pas nécessaire d'afficher l'ensemble des dimensions en continu sur le dispositif *GestureView*. Lorsque les situations sont nominales et n'exigent pas une attention particulière en matière de travail collaboratif dans l'exécution des flots procéduraux, alors la représentation des effets sur les *résultats* suffisent. Ces effets mettent en avant l'information avionique. Les dimensions traduisant de la singularité du comportement gestuel ne sont pas utiles, par exemple la durée d'un geste a été fréquemment décriée comme non pertinente par les pilotes contrairement aux dimensions sur le statut ou sur la complétude. A l'inverse, les pilotes apprécient d'avoir les effets sur les *impressions* en complément des effets sur les *résultats* dans les cas de situations anormales où la coordination entre les deux pilotes requiert une rythmique entre leurs gestes. Par exemple, la durée est ici plus importante puisqu'elle peut indiquer l'inactivité, la réflexion, l'hésitation, le stress du pilote qui agit sur l'interface tactile. Néanmoins, quelle que soit la situation rencontrée, au regard de l'ensemble de notre travail de recherche, nous considérons que les dimensions utilisées pour afficher les effets des *résultats* sont indispensables pour assurer la conscience mutuelle. Elles priment sur les autres dimensions.

Pour répondre à la deuxième question de recherche relative à la représentation pré-attentive des dimensions utiles à la conscience mutuelle, nous avons situé notre mode de représentation à la fois par rapport à la suppléance, c'est-à-dire, un enrichissement d'un phénomène toujours présent dans l'espace perceptif du pilote, et dans le même temps par rapport à la représentation iconique la plus adaptée aux besoins opérationnels des pilotes. Nous avons mené un état de l'art sur les représentations des gestes utilisées dans les travaux collaboratifs en cas de situations distribuées et co-localisées (y compris mixtes). Nous avons constaté la prédominance des représentations des gestes basées sur la morphologie des utilisateurs. Malgré les avantages de ces représentations, elles s'avèrent inadaptées au poste

de pilotage des avions de ligne. Nous citerons ici trois limites rédhibitoires : la duplication exacte de l'interface entre chaque utilisateur du système pour contextualiser les gestes, l'absence de pré-attentivité et le besoin d'avoir une concentration accrue pour comprendre les gestes. D'abord, la première limite va à l'encontre de l'intérêt d'avoir des écrans tactiles aux affichages dynamiques et adaptés aux tâches respectives des pilotes. Ensuite, l'activité de pilotage requiert des afficheurs dont les informations focalisent pendant le moins de temps possible l'attention des pilotes, afin d'éviter d'allouer trop de ressource cognitive pour accéder à l'information puis pour la traiter. En cas de mauvaise conception, la principale conséquence serait par exemple, lors d'un très haut niveau de charge cognitif, d'arriver à un effet tunnel (le pilote s'isole sur l'acquisition et le traitement d'une information au détriment des autres informations utiles à la gestion de la situation). En conséquence, nous avons proposé d'explorer une nouvelle manière de représenter les gestes qui puisse afficher pré-attentivement les dimensions utiles à la conscience mutuelle. A l'inverse des représentations morphologiques basées sur les principes de l'art figuratif, nous choisissons de concevoir une représentation abstraite afin d'afficher uniquement les dimensions utiles à la conscience mutuelle. Pour atteindre cela, nous empruntons deux concepts théoriques clés : les *qualia* proposés par le courant Représentationnaliste, la convergence des fonctions proposé par le philosophe Gilbert Simondon. Les *qualia* sont des phénomènes permettant aux pilotes de faire coïncider une représentation iconique avec une expérience vécue (e.g. une sensation corporelle comme la fatigue ou un affect comme le stress). Nous pensons qu'ils peuvent restituer les effets d'impression produits par les gestes donc enrichir la conscience d'un pilote sur le comportement de l'autre pilote. A propos du second concept, la convergence des fonctions, l'idée développée dans ce travail de recherche est qu'il est possible d'atteindre la pré-attentivité des informations pertinentes pour la conscience mutuelle en faisant converger à la fois les dimensions des gestes avec les informations avioniques. Pour nous aider à construire nos représentations, nous nous sommes appuyés sur plusieurs outils dont la Sémiologie graphique et la Gestalt afin de construire des visuels performants. Nous avons produit à l'état de maquette huit premières propositions pour notre outil de suppléance graphique, *GestureView*. Chaque proposition a été évaluée par des pilotes professionnels lors d'ateliers de conceptions participatives. A l'issue de cette première phase de design, nous avons conçu à partir des résultats précédents une nouvelle version graphique et fonctionnelle pour *GestureView*. Cette version a de nouveau été évaluée, dans un premier temps, qualitativement par des équipages de pilotes professionnels lors d'ateliers du même type puis dans un second temps, elle a été évaluée quantitativement avec des utilisateurs non-experts pour obtenir des résultats sur la qualité pré-attentive du dispositif.

Ces résultats nous ont permis d'apporter des éléments de réponse à la question de recherche sur la représentation pré-attentive des dimensions utiles à la conscience mutuelle. Nous en retenons deux principaux :

- En accord avec les résultats émis sur le changement de paradigme pour les dimensions sur la localisation et sur le mouvement des gestes, les pilotes ont confirmé notre hypothèse sur l'inadéquation d'utiliser une représentation morphologique pour représenter les gestes des pilotes. En effet, les pilotes n'ont pas besoin d'avoir la

représentation de la main sur l'écran. Cette information est trop lourde visuellement et ne permet pas de distinguer les dimensions utiles à la conscience mutuelle. La représentation par l'abstraction a été très appréciée et certains pilotes ont même déclaré qu'ils avaient confiance en *GestureView*. Nous pensons que ce constat provient du fait que ce type de représentation crée une distance entre les pilotes et leurs propres sensations. Pour rappel, les pilotes apprennent à distinguer leurs sensations par rapport au comportement réel de l'avion afin d'éviter les illusions sensorielles.

- Notre dernière proposition de construction, pour la représentation des gestes numériques, basée principalement sur la Sémiologie graphique et la Gestalt a été évaluée performante par les pilotes et les utilisateurs non-experts pour accéder rapidement aux dimensions des gestes. Les variables de couleur, grain, saturation, forme (pictogrammes) combinées à l'animation et aux lois de la Gestalt (e.g. continuité, proximité, similitude, etc.) favorisent une conception pré-attentive. Notre travail a permis d'exclure la variable visuelle de flou, jugée dangereuse par un pilote.

Limites et perspectives

Au regard de notre travail de recherche, nous avons identifié quatre pistes de travaux futurs : évaluer *GestureView* dans un contexte de simulateur d'avion de ligne (turbulences et connecté aux autres instruments avioniques), développer un nouveau design, intégrer les autres questions de Greenberg et Gutwin, le concept du monopilote à distance.

Évaluer *GestureView* dans un contexte de simulateur d'avion de ligne

Le concept de *GestureView* a été apprécié des pilotes. Cependant, bien que nous ayons progressivement augmenté le niveau de maquettage en commençant par des croquis aux feutres, puis des maquettes papiers, suivi des maquettes visuelles de haute qualité mais avec des interactions simulées, jusqu'au développement d'un prototype comportant une représentation graphique de haute qualité en relation avec des interactions gestuelles fonctionnelles et adaptées aux contraintes aéronautiques, tous les designs ont été évalués d'une part sur une plateforme fixe située dans un laboratoire et d'autre part sans connexion avec le reste des instruments de bord. Il serait intéressant de poursuivre ce travail en évaluant *GestureView*, connecté au système avionique, dans un simulateur d'avion de ligne fonctionnel ou bien sur un simulateur dynamique à 6 degrés de liberté tel que celui conçu par le projet Airtius. Nous pourrions ainsi évaluer la performance pré-attentive de *GestureView* en situation dégradée (turbulences) et analyser des données comme le temps de réaction, le nombre d'erreur et la distance parcourue par le balayage visuel des pilotes. Par ailleurs, cette étude permettrait d'évaluer l'intérêt d'afficher les dimensions des gestes numériques sur les effets des *impressions* en cas de situation anormales pour améliorer la conscience mutuelle. Enfin, notre travail de recherche a impliqué peu de pilotes dans les séances d'évaluations (5 pilotes pour les huit premiers designs et 2 binômes pour le dernier design). Ce fait s'explique principalement par la complexité de trouver des pilotes

professionnels, avec de l'expérience, disponibles en même temps pour former des binômes. Lors des évaluations en condition de simulateur, il serait important d'augmenter le nombre de participant.

Développer un nouveau design

Les résultats présentés lors de la dernière étude proposent plusieurs conseils pour améliorer la représentation de *GestureView*. Une perspective que nous pensons intéressante peut être de créer un nouveau design en partant de notre dernière version de représentation des dimensions des gestes numériques. Nous y respecterions d'abord les conseils des pilotes comme par exemple l'accentuation de la dimension de la complétude par un objet graphique. Ensuite, en accord avec notre constat général émis précédemment sur l'intérêt de l'affichage des effets selon le moment observé dans le déroulement d'un flot procédural, il pourrait être intéressant d'avoir pour *GestureView* deux affichages : un premier affichage durant l'exécution du flot, comprenant les effets des *impressions* et des *résultats*, puis un second affichage présentant uniquement les effets des *résultats* des gestes. Ce travail permettrait d'identifier précisément les types d'effets que l'on peut associer ou combiner à chaque dimension en fonction des différentes situations (e.g. nominales, anormales). Ce nouveau design pourrait être évalué dans un simulateur tel que mentionné précédemment.

Intégrer les autres questions de Greenberg et Gutwin

Nos questions de recherche sont inspirées de deux des cinq questions posés par (Saul Greenberg and Gutwin 2016) sur le travail collaboratif à distance et co-localisé. Une des pistes de travail peut être de traiter les trois autres questions de recherche. En effet, nous pensons que leur exploration enrichirait la qualité de *GestureView* d'abord par rapport au contexte aéronautique mais également pour l'ensemble des travaux nécessitant des outils de collaboration distribuée et co-localisée en relation avec le geste. Ce travail pourrait être coordonné avec le développement d'un nouveau design afin d'approfondir le niveau de détail des dimensions en matière de conscience mutuelle. De plus, il serait pertinent d'associer ce niveau de détail pour chaque dimension à une recherche sur le choix des variables visuelles pour approfondir la qualité pré-attentive de *GestureView*.

Le concept du monopilote à distance

Le développement croissant de l'automatisation des systèmes avioniques dans les postes de pilotage et la diminution du nombre de pilote sont deux facteurs ayant conduit les industriels à travailler sur le concept de monopilote (*SPO* ou *Single Pilot Operations*). L'ambition à long terme de ce concept est d'avoir un avion avec à son bord un seul pilote, accompagné à distance d'un second pilote situé dans une station au sol. Ce dernier pourrait assister plusieurs pilotes comme c'est le cas actuellement avec les contrôleurs aériens. Concernant l'ambition à court terme, les deux pilotes continuent d'être présent ensemble dans le poste de pilotage de l'appareil. Néanmoins durant la phase de croisière, l'un des pilotes sera en repos, alors que l'autre assurera le rôle de monopilote, assisté des automatisations du système avionique. Au-delà d'un positionnement politique et éthique sur

l'avenir du métier de pilote (comme ce fut le cas lors de la réduction des équipages de 3 à 2 pilotes avec le développement des glass cockpits) nous pensons que notre système de suppléance peut devenir une piste de recherche intéressante pour assurer la coordination entre les pilotes en vol et les pilotes au sol. Lors de nos évaluations qualitatives avec les pilotes sur la dernière version de *GestureView*, nous avons mené un scénario avec un rideau pour isoler les deux pilotes et reproduire une situation de travail à distance analogue au SPO. Les résultats montrent que les pilotes ont été capables de comprendre les gestes numériques avec *GestureView*. Par ailleurs, ils ont systématiquement accompagné plusieurs, ou même toutes les actions gestuelles. Il serait intéressant d'évaluer *GestureView* dans les mêmes conditions par rapport à l'usage de la parole afin de savoir si *GestureView* peut réduire l'usage de la parole, favoriser la conscience mutuelle et devenir un outil de substitution se soustrayant totalement à la présence des gestes physiques.

TABLE DES FIGURES

Figure 1. Séance d'observation d'un équipage de pilotes sur un simulateur non certifié de l'ENAC.	VIII
Figure 2. Base de données relationnelles du projet Airtius.....	VIII
Figure 3. A gauche, <i>Flight Control Unit</i> (FCU) de l'Airbus A320. Au milieu, Yoke standard produit par Boeing. A droite, <i>Sidestick</i> standard produit par Airbus.	12
Figure 4. A gauche, interface du <i>Primary Flight Display</i> (PFD) de l'Airbus A380. A droite, système PAPI.	13
Figure 5. A gauche, <i>Multi Control Display Unit</i> (MCDU) sur l'Airbus A320. A droite, MCDU sur l'Airbus A350.....	13
Figure 6. <i>Navigation Display</i> (ND) affiché à la gauche du PFD de l'Airbus A380.....	14
Figure 7. Les sept principales phases de vol (le pré-vol ou également appelé roulage, le décollage, la montée, la croisière, la descente, l'approche et l'atterrissage).....	15
Figure 8. Le PF assis à droite lit la « Before Takeoff » checklist.	16
Figure 9. « Before Start » checklist affiché sur l'écran multifonction du piédestal du Boeing 777.....	17
Figure 10. Modèle de la conscience de situation par Mica Endsley, 1995.....	18
Figure 11. Balayage avant et après vol sur les Boeing de la série 737.	21
Figure 12. Poste de pilotage du Concorde, premier vol 1969.	28
Figure 13. A gauche, le poste de pilotage de l'A310, premier vol 1982. A droite, détail sur son ECAM.	29
Figure 14. A gauche, le panneau en tête haute de l'A310 (1ère génération de glass cockpit). A droite, celui de l'A320 (2ème génération de glass cockpit).	30
Figure 15. Poste de pilotage de l'A380, premier vol 2006.	31
Figure 16. a) composants graphiques (<i>widgets</i>), b) exemple de structure d'un arbre (ici <i>pushbutton</i>), c) interface perçue par le pilote sur un MFD.	32
Figure 17. Synthetic Vision System de la série Primus Epic développé par Honeywell Aerospace et Dassault Aviation System, certifié en 2011 par la FAA pour le Falcon 900LX, un avion d'affaire à deux pilotes.	33
Figure 18. Rangée du haut, Symmetrie Flight Deck par Gulfstream basé sur la série Primus Epic de Honeywell, certifié en 2014 par la FAA pour le Gulfstream G500, un avion d'affaire à deux pilotes (à gauche, une vue d'ensemble ; au milieu, détail sur les rebords pour saisir la surface ; à droite, une commande de contrôle physique des MFD). Rangée du bas, Pro Line Fusion	

par Rockwell Collins, certifié en 2014 par la FAA pour le Legacy 500, un avion d'affaire à deux pilotes.....	34
Figure 19. A gauche, <i>ODICIS</i> , 2011. A droite, <i>Avionics 2020</i> par Thalès Avionics, 2014.....	35
Figure 20. Détail d'une interaction sur le prototype Avionic 2020 par Thalès Avionics, 2014.....	36
Figure 21. Au cours d'un entretien, un pilote présente l'importance de l'inclinaison des contrôleurs physiques pour la conscience de la situation.	38
Figure 22. Croquis dessinés pendant les phases d'observations de l'activité gestuelle des pilotes, représentant plusieurs postures des mains en train de manipuler des contrôleurs physiques.	39
Figure 23. Projet <i>Put, That, There</i> par Richard Bolt, 1980.	50
Figure 24. Schéma du projet <i>Charade</i> par Thomas Baudel et Michel Baudouin-Lafon, 1995.....	53
Figure 25. Exemple de vocabulaire des gestes numériques du projet <i>Charade</i> . Les actions sont indiquées au-dessus de chaque composition de pictogrammes : « Page suivante », « Page suivante x2 », « Page précédente », « Aller au chapitre ».	54
Figure 26. Schéma descriptif de construction des gestes numériques pour <i>Charade</i>	54
Figure 27. Schéma descriptif des degrés de liberté de la main par David Sturman, 1992.....	56
Figure 28. Caractéristiques constitutives de la dimension sur les modalités d'entrée et de sortie des gestes numériques.....	61
Figure 29. Caractéristiques constitutives de la dimension sur l'identification des gestes numériques.	63
Figure 30. Caractéristiques constitutives sur les coordonnées des gestes numériques.....	64
Figure 31. Caractéristiques constitutives de la dimension sur la temporalité des gestes numériques.	65
Figure 32. Caractéristiques constitutives de la dimension sur le mouvement des gestes numériques.	66
Figure 33. Classification des gestes par Ian M. Bullock.....	67
Figure 34. Caractéristiques constitutives de la dimension sur le statut des gestes numériques.	68
Figure 35. Caractéristiques constitutives de la dimension sur la fonction des gestes numériques.	68
Figure 36. Citations d'un terme par un autre dans les définitions des dictionnaires (tableau produit par Dubois).....	74
Figure 37. Les trois colonnes de gauche présentent les caractéristiques pour chaque terme. La colonne de droite indique la similitude entre ces caractéristiques et les dimensions des gestes numériques.....	76
Figure 38. Détail de l'étude d'analyse gestuelle sur l'ensemble d'un vol commercial.....	81

Figure 39. A gauche, exemple de représentation spatiale des déplacements de la main du pilote sur le panneau de contrôle supérieur (Overhead panel), à droite, détail de l'image de gauche.	82
Figure 40. Analyse du flot procédural associé à l'activation des brûleurs anti-givres réalisé par un pilote sur un Boeing 737-800.	85
Figure 41. Observation d'un geste accentué.	86
Figure 42. Exemple de flot procédural, ici « After Takeoff » sur série A318, A319, A320, A321.	87
Figure 43. Synthèse des traits et des dimensions retenus comme caractéristiques des gestes à afficher pour nos propositions futures de design graphique.	90
Figure 44. <i>Sunbather</i> par David Hockney, 1966.	95
Figure 45. Premier rang : ShadowHand par Wood et al., 2016.	102
Figure 46. Représentation d'une trace de la main par Yamashita et al. 2011.	103
Figure 47. Premier rang à gauche : ClearBoard par Ishii et al., 1992 ; au milieu : Vidéo en temps réel des gestes à distance, Alem et al., 2011 ; à droite : Kirk et al., 2005. Deuxième rang : Projet de représentation hybride entre la représentation dynamique des gestes sur la surface interactive et une vidéo des utilisateurs à distance par Tang et al., 2010.	103
Figure 48. Premier rang à gauche : Les quatre formes de curseurs proposés par Greenberg et al. ; à droite : Le projet de Kim et al. montre un utilisateur en train de construire un origami. Il est assisté par un utilisateur à distance. La dynamique de ses gestes est représentée par un curseur signalé par une boule bleue et suivi par une trace représentée par le trait en 3D bleu, tandis que la représentation dynamique de ses mains est montrée par une couleur orange avec une légère opacité ; Deuxième rang : Représentation de la trace pour signifier le déplacement du geste par Tang et al., 2007.	104
Figure 49. A gauche, déclinaison de représentation des gestes en situation co-localisée ; A droite, mise en situation avec des utilisateurs par Pinelle et al., 2008.	106
Figure 50. A gauche, une représentation des bras et des mains et à droite une représentation par caméra par Doucette et al., 2015.	106
Figure 51. A gauche, Tarquin et Lucrece par Tintoret (entre 1580 et 1590) ; A droite, L'acrobate bleu par Picasso (1929).	108
Figure 52. A gauche et au milieu, texture ajoutée de gradient de couleur puis tatouage par Genest et al., 2013 ; A droite, représentation du squelette des mains avec le dispositif leapmotion.	110
Figure 53. A gauche, les dimensions de la caractérisation pour la représentation des gestes par McAweeney ; A droite, notre cadre de dimensions gestuelles à représenter pour la conscience mutuelle des pilotes.	116
Figure 54. Niveau des variables rétiniennes par Jacques Bertin.	118
Figure 55. Carte représentant la perte des soldats de l'armée napoléonienne durant la campagne de Russie par Charles Joseph Minard, 1869.	120
Figure 56. <i>Presse citron</i> par Philippe Starck, Alessi, 1987.	123

Figure 57. Lecture de gauche à droite : Boeing 777X, <i>Pro Line fusion2</i> par Rockwell Collins, Comac 919, Dassault Falcon 5X, <i>EASy</i> et F35, <i>TR3</i> par Elbit Systems and Harris.....	125
Figure 58. Utilisation des cartes de support à la conversation lors d'une discussion avec pilote.	126
Figure 59. a) Interagir sur les systèmes avioniques directement sur son bras, b) Enregistrer ses flots gestuels dans une base de données, c) Avoir un retour d'information sur l'évolution temporelle du flot gestuel, d) Collaborer avec une représentation virtuelle, e) Utiliser son corps pour faire des réglages, f) Régler un contrôleur physique directement par son corps ou lui attribuer une fonction, g) Projeter les pages systèmes et être guidé pour naviguer en réalité augmentée. h) Visualiser la timeline des flots, i) Régler son rythme en fonction de sa fatigue, j) Afficher son rythme sur soi, k) Ressentir le geste de l'autre par un gant, l) Projeter la carte dans le poste de pilotage.	127
Figure 60. Illustration donnée dans un manuel d'apprentissage pour deux flots procéduraux à réaliser par les deux pilotes après avoir démarré les moteurs.	128
Figure 61. a) Ressentir une information et voir le flot procédural à réaliser ; b) Concept de vision du flot dans le casque ; c) Représentation globale du concept.	129
Figure 62. A gauche, maquettage basse fidélité par vidéo ; A droite, entretien avec un pilote professionnel.....	130
Figure 63. Vue globale des croquis.	131
Figure 64. Exemples de croquis produits lors de l'atelier par les participants.	132
Figure 65. A gauche, vue de la plateforme en bois ; A droite, modélisation de la plateforme pour l'atelier de fabrication.....	134
Figure 66. Proposition de représentation par l'abstraction.	140
Figure 67. Représentation de la position exacte du point de contact.	140
Figure 68. Représentation mimétique de la surface de l'autre.	140
Figure 69. Associer le mouvement à la temporalité.	141
Figure 70. Idée d'une timeline pour l'équipage.	141
Figure 71. Exploration de la variable de grain.	141
Figure 72. Exploration esthétique.....	141
Figure 73. Dissocier deux instants par la représentation.....	142
Figure 74. Exploration graphique pour la représentation des flèches.....	142
Figure 75. Représentation du mouvement du geste par le déplacement d'un objet cubique.	142
Figure 76. Représentation d'une fonction à deux états.....	143
Figure 77. Animation de remplissage.....	143
Figure 78. Représenter la fonction avec quatre états.....	143
Figure 79. Représentations des fonctions en 2D par une analogie aux formes des contrôleurs physiques.	144

Figure 80. Représentations des fonctions en 3D par une analogie aux formes des contrôleurs physiques.	144
Figure 81. Exploration d'une représentation par l'abstraction.	144
Figure 82. Représentation d'un flot procédural.	144
Figure 83. Représentations en deux temps d'un flot procédural, à gauche une vue synthétique de l'ensemble et à droite chaque geste apparait indépendant...	145
Figure 84. Deux propositions de représentation des déplacements inspirés des propositions de Jacques Bertin.	145
Figure 85. Chronologie des ateliers de conceptions participatives regroupées par sessions de designs.	147
Figure 86. <i>Overhead panel</i> présenté pour la première session. En haut, affichage du menu principal montrant les six principaux systèmes avioniques ainsi que trois systèmes subsidiaires (Lights, Com., Map). En bas, exemple d'affichage de l'interface en cours de fonctionnement.	148
Figure 87. <i>Overhead panel</i> présenté pour la deuxième session. Exemple d'affichage de l'interface en cours de fonctionnement. Les six systèmes avioniques sont disposées en haut de l'interface, les fonctions apparaissent en dessous et sont connectées par des réseaux.	148
Figure 88. <i>Flight Control Unit</i> présenté pour la troisième session. Les quatre fonctions sont disposées en haut de l'interface. En haut, affichage de l'interface sans interaction. En bas, affichage de l'interface en cours de fonctionnement.	149
Figure 89. Les scénarios utilisés pour chaque design.	150
Figure 90. Descriptif du Design 1 avec une mise en situation sur la plateforme (a) ; deux illustrations de l'interface GV représentant : un geste réalisé pendant un flot procédural (b), le flot terminé (c) ; une vue des variables graphiques associées aux dimensions des gestes (d).	151
Figure 91. Descriptif du Design 2 avec une mise en situation sur la plateforme (a) ; trois illustrations de l'interface GV représentant : le PM est en train de faire un geste dans le cadre d'un flot procédural (b), ce geste dépasse la durée recommandée par le système avionique pour accomplir l'action (c), l'action est accomplie (d) ; une vue des variables graphiques associées aux dimensions des gestes (e).	152
Figure 92. Descriptif du Design 3 avec une mise en situation sur la plateforme (a) ; trois illustrations de l'interface GV représentant : le PM est en train de faire un geste dans le cadre d'un flot procédural (b), le PM demande la confirmation au PF pour accomplir son geste sur la fonction « ENG 2 Agent 1 dish » (c), le flot procédural est accompli (d) ; une vue des variables graphiques associées aux dimensions des gestes (e).....	153
Figure 93. Descriptif du Design 4 avec une mise en situation sur la plateforme (a) ; trois illustrations de l'interface GV représentant : le PM est en train de faire un geste dans le cadre d'un flot procédural (b), le PM progresse dans l'exécution de son flot procédural (c), le flot procédural est accompli (d) ; une vue des variables graphiques associées aux dimensions des gestes (e).	154
Figure 94. Descriptif du Design 5 avec une mise en situation sur la plateforme (a) ; trois illustrations de l'interface GV représentant : l'état idle de la fonction Speed (SPD) du <i>Flight Control Unit</i> (FCU) (b), une empreinte apparait pour	

signifier le contact du doigt du PF en bas à gauche de la fonction SPD du FCU (c), le cercle de l’empreinte s’élargit et le grain disparaît progressivement suivant la durée de contact (d) ; une vue des variables graphiques associées aux dimensions des gestes (e).....	155
Figure 95. Descriptif du Design 6 avec une mise en situation sur la plateforme (a) ; une illustration de l'interface GV représentant : une ligne apparaît pour signifier le contact du doigt du PF à droite de la zone d’interaction sur la fonction Speed du <i>Flight Control Unit</i> (b) ; une vue des variables graphiques associées aux dimensions des gestes (c).....	156
Figure 96. Descriptif du Design 7 avec une mise en situation sur la plateforme (a) ; une illustration de l'interface GV représentant : le PF a sélectionné le fonction Speed du <i>Flight Control Unit</i> ce qui a enclenché la variable floue sur les autres fonctions (b) ; une vue des variables graphiques associées aux dimensions des gestes (c).	157
Figure 97. Descriptif du Design 8 avec une mise en situation sur la plateforme (a) ; une illustration de l'interface GV représentant : les différents grains utilisés pour signifier le déplacement du geste vers la gauche ou la droite sur le <i>Flight Control Unit</i> (b) ; une vue des variables graphiques associées aux dimensions des gestes (c).	158
Figure 98. Dispositif de la version finale de <i>GestureView</i>	169
Figure 99. Vue du panneau de contrôle des systèmes avioniques. La page affichée est celle du système de gestion des moteurs. En haut à gauche, un panneau de gestion radio et en bas à gauche, un afficheur de checklist.....	170
Figure 100. États du Touch. A gauche, état Idle, à droite état Pressed.	171
Figure 101. États du BraceTouch. A gauche, état Idle, au milieu, état Pressed et à droite l’état Clicked.	172
Figure 102. États du TimeTouch. (a) Idle, (b) Pressed, (c) Checked (Écran du PM à gauche et <i>GestureView</i> sur l’écran du PF à droite), (d) Crosschecked, (e) Running ou Waiting, (f) Clicked.....	173
Figure 103. Le design de <i>GestureView</i> avec la fenêtre de la tâche de suivi sur un autre écran.....	176
Figure 104. Trois parties sont présentés sur <i>GestureView</i> (A, B, C).....	177
Figure 105. Quatre exemples de propositions graphiques pour signifier la durée d'un geste avec la variable de grain combinée à une animation temporelle.	177
Figure 106. Fonctionnement des rectangles affichant les dimensions de la temporalité, de l’intention et du statut en fonction du type de geste.	178
Figure 107. Agenda des séances avec les pilotes.....	179
Figure 108. Scénario 3 joué avec un rideau.....	180
Figure 109. Nombre d’items énoncés, **, p-value < 0.01. S2 est comparé à S1, S4 est comparé à S3 avec un test de Wilcoxon sur données non-paramétriques (ne suivaient pas une loi normale).....	187
Figure 110. Nombre de systèmes énoncés.	188
Figure 111. Boîte à moustache montrant l’écart des distances au centre, en fonction des scénarios **, p-value < 0.05. S2 est comparé à S1 et S4 est comparé à S3, avec un t-test apparié sur données paramétriques.....	189

BIBLIOGRAPHIE

- Abbott, Terence S. 1993. "Functional Categories for Future Flight Deck Designs."
- Ahmad, Bashar I., Patrick M. Langdon, Simon J. Godsill, Robert Hardy, Lee Skrypchuk, and Richard Donkor. 2015. "Touchscreen Usability and Input Performance in Vehicles under Different Road Conditions." In . <https://doi.org/10.1145/2799250.2799284>.
- Alapetite, Alexandre, and R Fogh. 2012. "Direct Tactile Manipulation of the Flight Plan in a Modern Aircraft Cockpit." ... of *HCI Aero*.
- Albinsson, Pär Anders, and Shumin Zhai. 2003. "High Precision Touch Screen Interaction." In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*.
- Alem, Leila, and Jane Li. 2011. "A Study of Gestures in a Video-Mediated Collaborative Assembly Task." *Advances in Human-Computer Interaction* 2011: 1–7. <https://doi.org/10.1155/2011/987830>.
- Antoine, Axel, Sylvain Malacria, and Géry Casiez. 2017. "ForceEdge: Controlling Autoscroll on Both Desktop and Mobile Computers Using the Force." In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025605>.
- Arasse, Daniel. 1992. *Le Détail : Pour Une Histoire Rapprochée de La Peinture*. Flammarion. <https://editions.flammarion.com/Catalogue/hors-collection/art/le-detail>.
- Aristote, Roselyne Traduction de Dupont-Roc, and Jean et Lallot. 1980. *La Poétique*. Éd. du Seuil.
- Avsar, Huseyin, Joel E. Fischer, and Tom Rodden. 2016. "Designing Touch Screen User Interfaces for Future Flight Deck Operations." In *AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/DASC.2016.7777976>.
- Bachynskyi, Myroslav, Gregorio Palmas, Antti Oulasvirta, Jürgen Steimle, and Tino Weinkauf. 2015. "Performance and Ergonomics of Touch Surfaces: A Comparative Study Using Biomechanical Simulation." In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702607>.
- Baglioni, Mathias, Eric Lecolinet, and Yves Guiard. 2009. "Espace de Caractérisation Des Interactions Gestuelles Physiques Sur Dispositifs Mobiles." In *ACM International Conference Proceeding Series*. <https://doi.org/10.1145/1629826.1629859>.

- Baldus, Thorsten, and Patrick Patterson. 2008. "Usability of Pointing Devices for Office Applications in a Moving Off-Road Environment." *Applied Ergonomics*. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2008.01.004>.
- Barbé, Jérôme, Régis Mollard, and Marion Wolff. 2014. "Ergonomic Approaches to Integrate Touch Screen in Future Aircraft Cockpits." *Journal Europeen Des Systemes Automatisés*. <https://doi.org/10.3166/JESA.48.303-318>.
- Barbé, Jérôme, Marion Wolff, and Régis Mollard. 2013. "Human Centered Design Approach to Integrate Touch Screen in Future Aircraft Cockpits." In *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39330-3_45.
- Barth, Britt-Mari. 1985. "Jérôme Bruner et l'innovation Pédagogique." *Communication et Langages* 66 (1): 46–58. <https://doi.org/10.3406/colan.1985.3656>.
- Bartram, Lyn, Colin Ware, and Tom Calvert. 2001. "Moving Icons: Detection And Distraction." *Interact*.
- Baudel, Thomas, and Michel Beaudouin-Lafon. 1993. "Charade: Remote Control of Objects Using Free-Hand Gestures." *Communications of the ACM*. <https://doi.org/10.1145/159544.159562>.
- Becquet, Valentin, Catherine Letondal, Jean Luc Vinot, and Sylvain Pauchet. 2019. "How Do Gestures Matter for Mutual Awareness in Cockpits? Disclosing Interactions through Graphical Representations." In *DIS 2019 - Proceedings of the 2019 ACM Designing Interactive Systems Conference*. <https://doi.org/10.1145/3322276.3322306>.
- Belaën, Florence. 2005. "L'immersion Dans Les Musées de Science : Médiation Ou Séduction ?" *Culture & Musées*. <https://doi.org/10.3406/pumus.2005.1215>.
- Bellotti, Victoria, Maribeth Back, W. Keith Edwards, Rebecca E. Grinter, Austin Henderson, and Cristina Lopes. 2002. "Making Sense of Sensing Systems: Five Questions for Designers and Researchers." In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems Changing Our World, Changing Ourselves - CHI '02*, 415. New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/503376.503450>.
- Benejean, Marie. 2013. "Informatisation Des Productions d'information et Des Activités de Communication Dans Les Relations Pilotes-Contrôleurs: Contradictions et Reconfigurations Entre Technologies En Projet et Mises En Pratiques." [Http://www.Theses.Fr](http://www.Theses.Fr). Toulouse 3. <http://www.theses.fr/2013TOU30182>.
- Benjamin, Walter. 1936. *L'oeuvre d'art À l'époque de Sa Reproductibilité Technique*. Gallimard. <http://www.gallimard.fr/Catalogue/GALLIMARD/Folio/Folioplus-philosophie/L-oeuvre-d-art-a-l-epoque-de-sa-reproductibilite-technique>.
- Bertin, Jacques. 1967. *Semiologie Graphique. Les Diagrammes, Les Reseaux, Les Cartes*. The

- Biryukova, Elena, and Blandine Bril. 2002. "Bernstein et Le Geste Technique." *Technologies, Idéologies, Pratiques : Revue d'Anthropologie Des Connaissances* XIV N°2: 49–68.
- Block, Jack. 1995. "A Contrarian View of the Five-Factor Approach to Personality Description." *Psychological Bulletin* 117 (2): 187–215. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.117.2.187>.
- Bolt, Richard A. 1980. "'Put-That-There': Voice and Gesture at the Graphics Interface." In *Proceedings of the 7th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1980*. <https://doi.org/10.1145/800250.807503>.
- Bonelli, Stefano, and Linda Napoletano. 2013. "The Usability Evaluation of a Touch Screen in the Flight Deck." In *Cases on Usability Engineering: Design and Development of Digital Products*. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-4046-7.ch012>.
- Brave, Scott, Hiroshi Ishii, and Andrew Dahley. 1998. "Tangible Interfaces for Remote Collaboration and Communication." *Proceedings of the ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work*.
- Bretzner, L., I. Laptev, and T. Lindeberg. 2002. "Hand Gesture Recognition Using Multi-Scale Colour Features, Hierarchical Models and Particle Filtering." In *Proceedings of Fifth IEEE International Conference on Automatic Face Gesture Recognition*, 423–28. IEEE. <https://doi.org/10.1109/AFGR.2002.1004190>.
- Brock, Anke, Philippe Truillet, Bernard Oriola, and Christophe Jouffrais. 2014. "Making Gestural Interaction Accessible to Visually Impaired People." In *CHI '14*, 41–48. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44196-1_6.
- Brouet, Rémi, Renaud Blanch, and Marie Paule Cani. 2013. "Understanding Hand Degrees of Freedom and Natural Gestures for 3D Interaction on Tabletop." In *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40483-2_20.
- Bullock, Ian M., and Aaron M. Dollar. 2011. "Classifying Human Manipulation Behavior." In *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2011.5975408>.
- Buxton, W., R. Hill, and P. Rowley. 1985. "Issues and Techniques in Touch-Sensitive Tablet Input." In *Proceedings - Graphics Interface*.
- Cadoz, Claude. 1994. "Le Geste Canal de Communication Homme/Machine: La Communication Instrumentale." <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00867517>.
- Cassell, Justine. 1998. "A Framework for Gesture Generation and Interpretation." In *Computer Vision for Human-Machine Interaction*, 191–216.

<https://doi.org/10.1017/cbo9780511569937.013>.

- Chanquoy, Lucile., André. Tricot, and John Sweller. 2007. *La Charge Cognitive : Théorie et Applications*. Armand Colin. <https://www.librairiedialogues.fr/livre/629220-la-charge-cognitive-theorie-et-applications-lucile-chanquoy-andre-tricot-john-sweller-armand-colin>.
- Chatty, Stephane, and Patrick Lecoanet. 1996. "Pen Computing for Air Traffic Control." In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*.
- Chevaldonné, Marc, Frédéric Mérienne, and Marc Neveu. 2006. "Étude de l' Interaction Dans Une Interface de Type Cockpit." *Noûs*.
- Cirelli, Mauricio, and Ricardo Nakamura. 2014. "A Survey on Multi-Touch Gesture Recognition and Multi-Touch Frameworks." In *ITS 2014 - Proceedings of the 2014 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*. <https://doi.org/10.1145/2669485.2669509>.
- Cockburn, A., D. Masson, C. Gutwin, P. Palanque, A. Goguey, M. Yung, C. Gris, and C. Trask. 2019. "Design and Evaluation of Braced Touch for Touchscreen Input Stabilisation." *International Journal of Human Computer Studies* 122 (June 2018): 21–37. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2018.08.005>.
- Cockburn, Andy, Carl Gutwin, Philippe Palanque, Yannick Deleris, Catherine Trask, Ashley Coveney, Marcus Yung, and Karon MacLean. 2017. "Turbulent Touch: Touchscreen Input for Cockpit Displays." In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025584>.
- Coeugnet, Stéphanie. 2011. "La Pression Temporelle Dans Les Environnements Dynamiques : Le Cas de La Conduite Automobile," September. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00651328>.
- Cohen, Philip R., and David R. McGee. 2004. "Tangible Multimodal Interfaces for Safety-Critical Applications." In *Communications of the ACM*. <https://doi.org/10.1145/962081.962103>.
- Conversy, Stéphane, Stéphane Chatty, and Christophe Hurter. 2011. "Visual Scanning as a Reference Framework for Interactive Representation Design." *Information Visualization*. <https://doi.org/10.1177/1473871611415988>.
- Cootes, T. F., G. J. Edwards, and C. J. Taylor. 1998. "Active Appearance Models." In , 484–98. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/BFb0054760>.
- Corwin, William H. 1992. "In-Flight and Postflight Assessment of Pilot Workload in Commercial Transport Aircraft Using the Subjective Workload Assessment Technique." *The International Journal of Aviation Psychology*. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0202_1.
- Cui, Yuntao, and Juyang Weng. 2000. "Appearance-Based Hand Sign Recognition from

- Intensity Image Sequences." *Computer Vision and Image Understanding* 78 (2): 157–76. <https://doi.org/10.1006/CVIU.2000.0837>.
- Degani, A., and E. L. Wiener. 1993. "Cockpit Checklists: Concepts, Design, and Use." *Human Factors*. <https://doi.org/10.1177/001872089303500209>.
- Degani, Asaf, Everett Palmer, and Kristin Bauersfeld. 1992. "'Soft' Controls for Hard Displays. Still a Challenge." In *Proceedings of the Human Factors Society*.
- Dodd, Sonia, Jeff Lancaster, Andrew Miranda, Steve Grothe, Bob De Mers, and Bill Rogers. 2014. "Touch Screens on the Flight Deck: The Impact of Touch Target Size, Spacing, Touch Technology and Turbulence on Pilot Performance." In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*. <https://doi.org/10.1177/1541931214581002>.
- Doucette, Andre, Carl Gutwin, and Regan Mandryk. 2015. "Effects of Arm Embodiment on Implicit Coordination, Co-Presence, and Awareness in Mixed-Focus Distributed Tabletop Tasks." In *Proceedings - Graphics Interface*.
- Doyon-Poulin, Philippe, Benoit Ouellette, and Jean Marc Robert. 2014. "Effects of Visual Clutter on Pilot Workload, Flight Performance and Gaze Pattern." In *HCI-Aero 2014 - Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace*. <https://doi.org/10.1145/2669592.2669656>.
- Dretske, F. 2003. "Experience as Representation." *Philosophical Issues* 13: 67–82. <https://doi.org/10.2307/3050525>.
- Dretske, Fred. 1995. *Naturalizing the Mind*. Edited by MIT Press.
- Dubey, G, and C Moricot. 2006. "La Polyvalence Du Rafale Ou L'objet Total : La Relation Entre Une Technologie Nouvelle et Ses Utilisateurs" 81: 1–84.
- Dubois, Danièle, Nathalie Klumpp, and Mary-Annick Morel. 2002. "Geste, Mouvement, Action - Analyse Lexicale et Sémantique Des Concepts." *Technologies, Idéologies, Pratiques : Revue d'Anthropologie Des Connaissances XIV N°2*: 13–28.
- Eckstein, Megan. 2019. "Navy Reverting DDGs Back to Physical Throttles, After Fleet Rejects Touchscreen Controls." 2019. <https://news.usni.org/2019/08/09/navy-reverting-ddgs-back-to-physical-throttles-after-fleet-rejects-touchscreen-controls>.
- Endsley, M. R. 1995. "Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems." *Human Factors*. <https://doi.org/10.1518/001872095779049543>.
- Escalera, Sergio, Vassilis Athitsos, and Isabelle Guyon. 2018. "Challenges in Multimodal Gesture Recognition," 1–54.
- Federal Aviation Administration. 2004. "Advisory Circular No. 120-51E. Crew Resource Management Training."

http://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentID/22879.

- Focillon, Henri. 1943. "Vie Des Formes, Suivie de Eloge de La Main." https://www.puf.com/content/Vie_des_formes.
- Garg, Pragati, Pragati Garg, Naveen Aggarwal, and Sanjeev Sofat. 2009. "Vision Based Hand Gesture Recognition." *WORLD ACADEMY OF SCIENCE, ENGINEERING AND TECHNOLOGY*, 972--977. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.309.6231>.
- Gärtner, Matti, Lea Rohde-Liebenau, Simone Grimm, and Malek Bajbouj. 2014. "Working Memory-Related Frontal Theta Activity Is Decreased under Acute Stress." *Psychoneuroendocrinology*. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2014.02.009>.
- Genest, Aaron, Carl Gutwin, Anthony Tang, Michael Kalyn, and Zenja Ivkovic. 2013. "KinectArms: A Toolkit for Capturing and Displaying Arm Embodiments in Distributed Tabletop Groupware." In *Proceedings of the ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work, CSCW*. <https://doi.org/10.1145/2441776.2441796>.
- Gopher, Danial, and Emanuel Donchin. 1986. "Workload: An Examination of the Concept." *Handbook of Perception and Human Performance*, January. https://scholarcommons.usf.edu/psy_facpub/283.
- Greenberg, S., C. Gutwin, and M. Roseman. 1996. "Semantic Telepointers for Groupware." In *Proceedings - 6th Australian Conference on Computer-Human Interaction, OzCHI 1996*, 54–61. IEEE Computer. Soc. Press. <https://doi.org/10.1109/OZCHI.1996.559988>.
- Greenberg, Saul, and Carl Gutwin. 2016. "Implications of We-Awareness to the Design of Distributed Groupware Tools." *Computer Supported Cooperative Work: CSCW: An International Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10606-016-9244-y>.
- Grest, Daniel, Volker Krüger, and Reinhard Koch. 2007. "Single View Motion Tracking by Depth and Silhouette Information." In *Scandinavian Conference on Image Analysis*, 719–29.
- Guerreiro, Tiago, Paulo Lagoa, Hugo Nicolau, Daniel Gonalves, and Joaquim A. Jorge. 2008. "From Tapping to Touching: Making Touch Screens Accessible to Blind Users." *IEEE MultiMedia* 15 (4): 48–50. <https://doi.org/10.1109/MMUL.2008.88>.
- Gutwin, Carl, and Saul Greenberg. 2005. "The Importance of Awareness for Team Cognition in Distributed Collaboration." In *Team Cognition: Understanding the Factors That Drive Process and Performance*. <https://doi.org/10.1037/10690-009>.
- Hachaj, Tomasz, and Marek R. Ogiela. 2014. "Rule-Based Approach to Recognizing Human Body Poses and Gestures in Real Time." *Multimedia Systems* 20 (1): 81–99. <https://doi.org/10.1007/s00530-013-0332-2>.

- Heath, C C, and P Luff. 2011. "Gesture and Institutional Interaction." In *Embodied Interaction: Language and Body in the Material World*.
- Heath, Christian, and Paul Luff. 1992. "Collaboration and Control: Crisis Management and Multimedia Technology in London Underground Line Control Rooms Article in Computer Supported Cooperative Work - March." *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*. <https://doi.org/10.1007/BF00752451>.
- Helmreich, Robert L., and H. Clayton Foushee. 2010. "Why CRM? Empirical and Theoretical Bases of Human Factors Training." In *Crew Resource Management*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374946-8.10001-9>.
- Hoff, Lynn, Eva Hornecker, and Sven Bertel. 2016. "Modifying Gesture Elicitation: Do Kinaesthetic Priming and Increased Production Reduce Legacy Bias?" In *TEI 2016 - Proceedings of the 10th Anniversary Conference on Tangible Embedded and Embodied Interaction*. <https://doi.org/10.1145/2839462.2839472>.
- Hofstede, Geert. 2011. "Dimensionalizing Cultures: The Hofstede Model in Context." *Online Readings in Psychology and Culture*. <https://doi.org/10.9707/2307-0919.1014>.
- Hong, T. C., N. A. Kuan, T. K. Kiang, and S. K. T. John. 2011. "Evaluation of Input Devices for Pointing, Dragging and Text Entry Tasks On A Tracked Vehicle." *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting 55 (1): 2078–82*. <https://doi.org/10.1177/1071181311551433>.
- Hurter, Christophe, and Stéphane Conversy. 2007. "Extension d'un Modèle de Visualisation Pour La Caractérisation d'interfaces Graphiques Dynamiques." In *Proceedings of the 19th International Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine on - IHM '07, 39*. New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/1541436.1541444>.
- Hurter, Christophe, Stéphane Conversy, Jean Luc Vinot, and Yannick Jestin. 2009. "Représentations Écologiques de Données Temporelles: Exemples et Apports." In *ACM International Conference Proceeding Series*. <https://doi.org/10.1145/1629826.1629832>.
- Hutchins, Edwin. 1994. "Comment Le «cockpit» Se Souvient de Ses Vitesses." *Sociologie Du Travail*. <https://doi.org/10.3406/sotra.1994.2190>.
- Hutchins, Edwin, and Saeko Nomura. 2011. "Collaborative Construction of Multimodal Utterances." In *Embodied Interaction: Language and Body in the Material World*.
- Imbs, Paul. 1977. *Le Trésor de La Langue Française, Dictionnaire de La Langue Du XIXe et Du XXe Siècle (1789-1960)*. Éditions d.
- Ishii, Hiroshi, and Minoru Kobayashi. 1992. "Clearboard: A Seamless Medium for Shared Drawing and Conversation with Eye Contact." In *Conference on Human Factors in*

- ISO 9241-11. 2018. "ISO 9241-11:2018(Fr), Ergonomie de l'interaction Homme-Système — Partie 11: Utilisabilité — Définitions et Concepts." <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9241:-11:ed-2:v1:fr>.
- Izadi, Shahram, Ankur Agarwal, Antonio Criminisi, John Winn, Andrew Blake, and Andrew Fitzgibbon. 2007. "C-Slate: A Multi-Touch and Object Recognition System for Remote Collaboration Using Horizontal Surfaces." *Tabletop 2007 - 2nd Annual IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems*, 3–10. <https://doi.org/10.1109/TABLETOP.2007.5>.
- Jacobsen, Alan R, David A. Graeber, and John Wiedemann. 2010. "Crew Station Design and Integration (for Human Factors in Aviation)." In *Human Factors in Aviation*, 533–60. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374518-7.00017-1>.
- Jones, Denise R. 1990. "Three Input Concepts for Flight Crew Interaction with Information Presented on a Large-Screen Electronic Cockpit Display /," NASA technical memorandum ;, . <https://catalog.lib.fit.edu/Record/85015>.
- Kaaniche, Mohamed Bécha, and François Bremond. 2009. "Tracking HoG Descriptors for Gesture Recognition." In *2009 Sixth IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*, 140–45. IEEE. <https://doi.org/10.1109/AVSS.2009.26>.
- Kaminani, Sridher. 2011. "Human Computer Interaction Issues with Touch Screen Interfaces in the Flight Deck." In *AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/DASC.2011.6096098>.
- Karam, Maria, and m. c. Schraefel. 2005. "A Taxonomy of Gestures in Human Computer Interactions." *Technical Report, Eletronics and Computer Science*. <https://doi.org/10.1.1.97.5474>.
- Karam, Maria, and M. C. Schraefel. 2006. "Investigating User Tolerance for Errors in Vision-Enabled Gesture-Based Interactions." In *Proceedings of the Workshop on Advanced Visual Interfaces*. <https://doi.org/10.1145/1133265.1133309>.
- Kendon, A. 2004. *Gesture: Visible Action as Utterance*. Cambridge University Press. <https://books.google.fr/books?id=UHILQAAACAAJ>.
- Kendon, Adam. 1997. "Gesture." *Annual Review of Anthropology* 26 (1): 109–28. <https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.26.1.109>.
- Kilingaru, Kavyaganga, Jeffrey W. Tweedale, Steve Thatcher, and Lakhmi C. Jain. 2013. "Monitoring Pilot 'Situation Awareness.'" *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. <https://doi.org/10.3233/IFS-2012-0566>.
- Kim, Seungwon, Gun Lee, Weidong Huang, Hayun Kim, Woontack Woo, and Mark Billinghurst.

2019. "Evaluating the Combination of Visual Communication Cues for HMD-Based Mixed Reality Remote Collaboration." In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '19*, 1–13. New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300403>.
- Kirk, David, Andy Crabtree, and Tom Rodden. 2005. "Ways of the Hands." In *ECSCW 2005*, 1–21. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/1-4020-4023-7_1.
- Koh, Kyle, Hyunjoo Song, Daekyoung Jung, Bohyoung Kim, and Jinwook Seo. 2011. "What Do You See When You Interact with Friends Online?" In *Proceedings of the 2011 Annual Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems - CHI EA '11*, 2131. New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/1979742.1979911>.
- Kolbe, Dashiell Matthews. 2013. Method for determining valid touch screen inputs. US Patent App. 13/ 279,417, issued 2013.
- Krupka, Eyal, Alon Vinnikov, Aharon Bar-Hillel, Kfir Karmon, Noam Bloom, Daniel Freedman, Ilya Gurvich, et al. 2017. "Toward Realistic Hands Gesture Interface." In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '17*, 1887–98. New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025508>.
- Lacabanne, Marie. 2014. "Qu'est-Ce Que Naviguer ? : Analyse d'une Tâche de Pilotage Comme Préalable à La Conception d'un Système d'aide à La Gestion d'un Vol," December. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01305935>.
- Lamberti, Luigi, and Francesco Camastra. 2011. "Real-Time Hand Gesture Recognition Using a Color Glove." In , 365–73. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24085-0_38.
- Large, David R., Elizabeth Crundall, Gary Burnett, and Lee Skrypchuk. 2015. "Predicting the Visual Demand of Finger-Touch Pointing Tasks in a Driving Context." In . <https://doi.org/10.1145/2799250.2799256>.
- Larkin, J. 1981. "The Role of Problem Representation in Physics." *Mental Models*.
- Lavie, Nilli, Aleksandra Hirst, Jan W. De Fockert, and Essi Viding. 2004. "Load Theory of Selective Attention and Cognitive Control." *Journal of Experimental Psychology: General*. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.133.3.339>.
- Lenay, Charles. 2006. "Enaction, Externalisme et Suppléance Perceptive." *Intellectica. Revue de l'Association Pour La Recherche Cognitive* 43 (1): 27–52. <https://doi.org/10.3406/intel.2006.1326>.
- Leroi-Gourhan, A. 1964. *Le Geste et La Parole I, Technique et Langage*. Edited by Albin Michel. <https://www.albin-michel.fr/ouvrages/le-geste-et-la-parole-tome-1-9782226017284>.
- Leroi-Gourhan, Andre. 1965. *Le Geste et La Parole II, La Mémoire et Les Rythmes*. Edited by

Albin Michel. <https://www.albin-michel.fr/ouvrages/le-geste-et-la-parole-tome-2-9782226023247>.

Leroi-Gourhan, André. 1943. *L'Homme et La Matière*. Edited by Albin Michel.

Letondal, Catherine, Jean Luc Vinot, Sylvain Pauchet, Caroline Boussiron, Stéphanie Rey, Valentin Becquet, and Claire Lavenir. 2018. "Being in the Sky: Framing Tangible and Embodied Interaction for Future Airliner Cockpits." In *TEI 2018 - Proceedings of the 12th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*. <https://doi.org/10.1145/3173225.3173229>.

Ligda, Sarah V., Ute Fischer, Kathleen Mosier, Michael Matessa, Vernol Battiste, and Walter W. Johnson. 2015. "Effectiveness of Advanced Collaboration Tools on Crew Communication in Reduced Crew Operations." In *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20373-7_40.

Lim, Yixiang, Alessandro Gardi, Roberto Sabatini, Subramanian Ramasamy, Trevor Kistan, Neta Ezer, Julian Vince, and Robert Bolia. 2018. "Avionics Human-Machine Interfaces and Interactions for Manned and Unmanned Aircraft." *Progress in Aerospace Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.05.002>.

Lin, Chiuhsiang Joe, Chi No Liu, Chin Jung Chao, and Hung Jen Chen. 2010. "The Performance of Computer Input Devices in a Vibration Environment." *Ergonomics*. <https://doi.org/10.1080/00140130903528186>.

Littré, Emile. 1994. *Emile Littré, Dictionnaire de La Langue Française*. Edited by Chicago. Imprimerie R.R Donnelley & Sons Company Encyclopaedia Britannica Inc. Chicago.

Loft, Shayne, Rebekah E. Smith, and Adella Bhaskara. 2011. "Prospective Memory in an Air Traffic Control Simulation: External Aids That Signal When To Act." *Journal of Experimental Psychology: Applied*. <https://doi.org/10.1037/a0022845>.

Logan, Gordon D. 1988. "Toward an Instance Theory of Automatization." *Psychological Review*. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.95.4.492>.

Lorenzo-Del-Catillo, and Nadine Couture. 2016. "The Aircraft of the Future : Towards the Tangible Cockpit To Cite This Version : The Aircraft of the Future : Towards the Tangible Cockpit." *Proceedings HCI-Aero '16*. <https://doi.org/10.1145/2950112.2964582>.

Lucchi, Aurélien, Patrick Jermann, Guillaume Zufferey, and Pierre Dillenbourg. 2010. "An Empirical Evaluation of Touch and Tangible Interfaces for Tabletop Displays." In *TEI'10 - Proceedings of the 4th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*. <https://doi.org/10.1145/1709886.1709917>.

Macé, Arnaud. 1998. *La Matière*. Flammarion.

- Mackay, Wendy E., and Anne Laure Fayard. 1997. "HCI, Natural Science and Design: A Framework for Triangulation across Disciplines." In *Proceedings of the Conference on Designing Interactive Systems: Processes, Practices, Methods, and Techniques, DIS*.
- Magnaudet, Mathieu, Stephane Chatty, Stephane Conversy, Sebastien Leriche, Celia Picard, and Daniel Prun. 2018. "Djnn/Smala: A Conceptual Framework and a Language for Interaction-Oriented Programming." *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*. <https://doi.org/10.1145/3229094>.
- Marotte, Henri. 2004. "Interfaces Homme-Systèmes Assistées d'Automates et Conscience de La Situation." *Interfaces Homme-Système Automatisées*.
- Matton, Nadine, Camille Vrignaud, Yves Rouillard, and Julie Lemarié. 2018. "Learning Flight Procedures by Enacting and Receiving Feedback." *Applied Ergonomics*. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.03.009>.
- McAweeney, Erin, Haihua Zhang, and Michael Nebeling. 2018. "User-Driven Design Principles for Gesture Representations." *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings 2018-April: 1–13*. <https://doi.org/10.1145/3173574.3174121>.
- McCarthy, Patsy, and Caroline Hatcher. 1996. "Using Language." In *Presentation Skills*. <https://doi.org/10.4135/9781849209595.n6>.
- McKeithen, Katherine B., Judith S. Reitman, Henry H. Rueter, and Stephen C. Hirtle. 1981. "Knowledge Organization and Skill Differences in Computer Programmers." *Cognitive Psychology*. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(81\)90012-8](https://doi.org/10.1016/0010-0285(81)90012-8).
- McKenna, Stephen J., and Kenny Morrison. 2004. "A Comparison of Skin History and Trajectory-Based Representation Schemes for the Recognition of User-Specified Gestures." *Pattern Recognition* 37 (5): 999–1009. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2003.09.007>.
- Mell, Jeremy. 1992. "Etude Des Communications Verbales Entre Pilote et Controleur En Situation Standard et Non-Standard." *Http://Www.Theses.Fr*, January. <http://www.theses.fr/1992TOU20042>.
- Merleau-Ponty, M. 1964. *L'Œil et l'Esprit*. Edited by Gallimard. *L'Œil et l'Esprit*. Paris. <https://doi.org/10.14375/np.9782070271191>.
- Merleau-Ponty, Maurice. 1945. *Phénoménologie de La Perception*. Gallimard.
- Migniot, Cyrille, and Fakhreddine Ababsa. 2013. "3D Human Tracking from Depth Cue in a Buying Behavior Analysis Context." In *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40261-6_58.
- Miller, George A. 1956. "The Magical Number Seven, plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information." *Psychological Review*.

<https://doi.org/10.1037/h0043158>.

Mkhinini, Maher, and Patrick Horain. 2013. "Reconnaissance de Gestes : Approches 2D & 3D," May. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01298134>.

Moeslund, Thomas B., Adrian Hilton, and Volker Krüger. 2006. "A Survey of Advances in Vision-Based Human Motion Capture and Analysis." *Computer Vision and Image Understanding*. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2006.08.002>.

Morris, Meredith Ringel, Andreea Danielescu, Steven Drucker, Danyel Fisher, Bongshin Lee, c. schraefel, and Jacob O. Wobbrock. 2014. "Reducing Legacy Bias in Gesture Elicitation Studies." *Interactions* 21 (3): 40–45. <https://doi.org/10.1145/2591689>.

Mott, Martez E., and Jacob O. Wobbrock. 2014. "Beating the Bubble: Using Kinematic Triggering in the Bubble Lens for Acquiring Small, Dense Targets." In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/2556288.2557410>.

Nagel, Thomas. 1974. "What Is It Like to Be a Bat?" *The Philosophical Review* 83 (4): 435. <https://doi.org/10.2307/2183914>.

Nehaniv, Chrystopher L., Kerstin Dautenhahn, Jens Kubacki, Martin Haegele, Christopher Parlitz, and Rachid Alami. 2005. "A Methodological Approach Relating the Classification of Gesture to Identification of Human Intent in the Context of Human-Robot Interaction." In *Proceedings - IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, 2005:371–77. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2005.1513807>.

Norman, Don. 2013. *The Design of Future Things. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*. Vol. 18. <https://doi.org/10.1002/hfm.20127>.

Noy, Y. Ian, Tracy L. Lemoine, Christopher Klachan, and Peter C. Burns. 2004. "Task Interruptability and Duration as Measures of Visual Distraction." *Applied Ergonomics*. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2003.11.012>.

Núñez, Rafael. 2016. *D'où Viennent Les Mathématiques?: Corps, Esprit et Imaginaire Humain. Modélisations Des Imaginaires*. Manucius.

Oikonomidis, Iason, Nikolaos Kyriazis, and Antonis A. Argyros. 2011. "Efficient Model-Based 3D Tracking of Hand Articulations Using Kinect." In *BMVC 2011 - Proceedings of the British Machine Vision Conference 2011*. <https://doi.org/10.5244/C25.101>.

Pape, Marc A. Le, and Ravi K. Vatrupu. 2009. "An Experimental Study of Field Dependency in Altered Gz Environments." In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/1518701.1518890>.

Pastena, Angela Di, Loris Tamara Schiaratura, and Françoise Askevis-Leherpeux. 2015. "Joindre

- Le Geste à La Parole : Les Liens Entre La Parole et Les Gestes Co-Verbaux." *L'Année Psychologique*. <https://doi.org/10.4074/s0003503315003061>.
- Pauchet, A., F. Coldefy, L. Lefebvre, S. Louis Dit Picard, A. Bouguet, L. Perron, J. Guerin, D. Corvaisier, and M. Collobert. 2007. "Mutual Awareness in Collocated and Distant Collaborative Tasks Using Shared Interfaces." In , 59–73. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74796-3_8.
- Pavlovic, Vladimir I., Rajeev Sharma, and Thomas S. Huang. 1997. "Visual Interpretation of Hand Gestures for Human-Computer Interaction: A Review." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. <https://doi.org/10.1109/34.598226>.
- Philippe Starck. 1997. "Interview de Philippe Starck." *L'oeil*, 1997.
- Pinelle, David, Miguel Nacenta, Carl Gutwin, and Tadeusz Stach. 2008. "The Effects of Co-Present Embodiments on Awareness and Collaboration in Tabletop Groupware." In *Proceedings - Graphics Interface*, 1–8. Canadian Information Process Society. <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=1375716>.
- Platon, and Georges Traduction de Leroux. 2002. *La République*.
- Rautaray, Siddharth S., and Anupam Agrawal. 2015. "Vision Based Hand Gesture Recognition for Human Computer Interaction: A Survey." *Artificial Intelligence Review* 43 (1): 1–54. <https://doi.org/10.1007/s10462-012-9356-9>.
- Rehm, Matthias, Nikolaus Bee, and Elisabeth André. 2008. "Wave Like an Egyptian: Accelerometer Based Gesture Recognition for Culture Specific Interactions." In , 13–22. British Computer Society. <https://vbn.aau.dk/en/publications/wave-like-an-egyptian-accelerometer-based-gesture-recognition-for>.
- Rekimoto, Jun. 2002. "SmartSkin: An Infrastructure for Freehand Manipulation on Interactive Surfaces." In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*.
- Rey-Debove, Josette, and Alain Rey. 2000. *Le Nouveau Petit Robert, Dictionnaire Alphabétique et Analogique de La Langue Française*.
- Rey, A. 1998. *Le Robert, Dictionnaire Historique de La Langue Française*.
- Rey, Alain. 1992. *Le Grand Robert, Dictionnaire de La Langue Française*.
- Roudaut, Anne, and Eric Lecolinet. 2007. "Un Espace de Classification Pour l'interaction Sur Dispositifs Mobiles." In *Proceedings of the 19th International Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine, IHM '07*. <https://doi.org/10.1145/1541436.1541456>.
- Roux, Valentine, and Blandine Bril. 2002. "Observation et Expérimentation de Terrain : Des Collaborations Fructueuses Pour l'analyse de l'expertise Technique. La Cas de La Taille de

Pierre En Inde." *Technologies, Idéologies, Pratiques: Revue d'Anthropologie Des Connaissances* XIV N°2: 29–47.

RTCA. 2011. "RTCA DO-315 - Minimum Aviation System Performance Standards (MASPS) for Enhanced Vision Systems, Synthetic Vision Systems, Combined Vision Systems and Enhanced Flight Vision Systems, Ed: SC-213." <https://standards.globalspec.com/std/1386657/rtca-do-315>.

Saussure, Ferdinand De, Charles Bally, Albert Sechehaye, and Albert Riedlinger. 1916. *Cours de Linguistique Générale*. 3ème édit.

Schmidt, Kjeld. 2002. "The Problem with 'Awareness': Introductory Remarks on 'Awareness in CSCW.'" *Computer Supported Cooperative Work*. <https://doi.org/10.1023/A:1021272909573>.

Schneider, Walter, and Richard M. Shiffrin. 1977. "Controlled and Automatic Human Information Processing: I. Detection, Search, and Attention." *Psychological Review*. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.84.1.1>.

Scholliers, Christophe, Lode Hoste, Beat Signer, and Wolfgang De Meuter. 2011. "Midas: A Declarative Multi-Touch Interaction Framework." In *Proceedings of the 5th International Conference on Tangible Embedded and Embodied Interaction, TEI'11*. <https://doi.org/10.1145/1935701.1935712>.

Schutte, Paul C., and Anna C. Trujillo. 1996. "Flight Crew Task Management in Non-Normal Situations." In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*.

Schvaneveldt, Roger W., Dennis B. Beringer, and John A. Lamonica. 2001. "Priority and Organization of Information Accessed by Pilots in Various Phases of Flight." *International Journal of Aviation Psychology*. https://doi.org/10.1207/S15327108IJAP1103_02.

Shotton, Jamie, Andrew Fitzgibbon, Mat Cook, Toby Sharp, Mark Finocchio, Richard Moore, Alex Kipman, and Andrew Blake. 2011. "Real-Time Human Pose Recognition in Parts from Single Depth Images." In *CVPR 2011*, 1297–1304. IEEE. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2011.5995316>.

Simondon, Gilbert. 1958. *Du Mode d'existence Des Objets Techniques*. Aubier, édition 2012. <https://editions.flammarion.com/Catalogue/philosophie-aubier/du-mode-dexistence-des-objets-techniques>.

Smedt, Quentin De, Hazem Wannous, and Jean Philippe Vandeborre. 2016. "Skeleton-Based Dynamic Hand Gesture Recognition." In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2016.153>.

Sobottka, Karin, and Ioannis Pitas. 1996. "Segmentation and Tracking of Faces in Color Images." In *Proceedings of the International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*. <https://doi.org/10.1109/afgr.1996.557270>.

- Soll, Henning, Solveig Proske, Gesine Hofinger, and Gunnar Steinhardt. 2016. "Decision-Making Tools for Aeronautical Teams: FOR-DEC and Beyond." *Aviation Psychology and Applied Human Factors* 6 (2): 101–12. <https://doi.org/10.1027/2192-0923/a000099>.
- Speelpenning, Tess, Alissa N. Antle, Tanja Doering, and Elise Van Den Hoven. 2011. "Exploring How Tangible Tools Enable Collaboration in a Multi-Touch Tabletop Game." In *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23771-3_45.
- Stanton, N. A., P. R.G. Chambers, and J. Piggott. 2001. "Situational Awareness and Safety." *Safety Science*. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(01\)00010-8](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(01)00010-8).
- Stanton, N. A., P. M. Salmon, G. H. Walker, E. Salas, and P. A. Hancock. 2017. "State-of-Science: Situation Awareness in Individuals, Teams and Systems." *Ergonomics*. <https://doi.org/10.1080/00140139.2017.1278796>.
- Sturman, David Joel. 1992. "Whole-Hand Input." Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology.
- Tang, A., C. Neustaedter, and S. Greenberg. 2007. "VideoArms: Embodiments for Mixed Presence Groupware." *People and Computers XX — Engage*, 85–102. https://doi.org/10.1007/978-1-84628-664-3_8.
- Tang, Anthony, Carman Neustaedter, and Saul Greenberg. 2004. "Embodiments and VideoArms in Mixed Presence Groupware."
- Tang, Anthony, Michel Pahud, Kori Inkpen, Hrvoje Benko, John C. Tang, and Bill Buxton. 2010. "Three's Company: Understanding Communication Channels in Three-Way Distributed Collaboration." In *Proceedings of the ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work, CSCW*. <https://doi.org/10.1145/1718918.1718969>.
- Tang, John C., and Scott L. Minneman. 1990. "Videodraw: A Video Interface for Collaborative Drawing." In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/97243.97302>.
- Tenney, Yvette J., William H. Rogers, and Richard W. Pew. 1998. "Pilot Opinions on Cockpit Automation Issues." *International Journal of Aviation Psychology*. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0802_2.
- Tory, Melanie, and Robert Kincaid. 2013. "Comparing Physical, Overlay, and Touch Screen Parameter Controls." In *ITS 2013 - Proceedings of the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*. <https://doi.org/10.1145/2512349.2512812>.
- Treisman, Anne. 1985. "Preattentive Processing in Vision." *Computer Vision, Graphics and Image Processing*. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(85\)80004-9](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(85)80004-9).
- Tufle, Er. 1983. "The Visual Display of Quantitative Information - Graphical Excellence." *CT*

Graphics, Cheshire.

- Ververs, Patricia May, and Patricia May. 1998. "Conformal Flight Path Symbology for Head-up Displays: Defining the Distribution of Visual Attention in Three-Dimensional Space." *ProQuest Dissertations And Theses; Thesis (Ph.D.)--University of Illinois at Urbana-Champaign, 1998.; Publication Number: AA19912410; ISBN: 9780599107274; Source: Dissertation Abstracts International, Volume: 59-11, Section: B, Page: 6099.; 193 P.* <http://adsabs.harvard.edu/abs/1998PhDT.....88V>.
- Vinot, Jean-Luc, Catherine Letondal, Sylvain Pauchet, and Stéphane Chatty. 2016. "Could Tangibility Improve the Safety of Touch-Based Interaction?" In . <https://doi.org/10.1145/2950112.2964581>.
- Voelker, Simon, Kjell Ivar Øvergård, Chat Wacharamanotham, and Jan Borchers. 2015. "Knobology Revisited: A Comparison of User Performance between Tangible and Virtual Rotary Knobs." In *Proceedings of the 2015 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, ITS 2015*. <https://doi.org/10.1145/2817721.2817725>.
- Walter, Robert, Gilles Bailly, and Jörg Müller. 2013. "StrikeAPose: Revealing Mid-Air Gestures on Public Displays." In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/2470654.2470774>.
- Wang, Isaac, Pradyumna Narayana, Dhruva Patil, Gururaj Mulay, Rahul Bangar, Bruce Draper, Ross Beveridge, and Jaime Ruiz. 2017. "Exploring the Use of Gesture in Collaborative Tasks." In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/3027063.3053239>.
- Welch, Greg, and Gary Bishop. 2006. "An Introduction to the Kalman Filter." In *Practice*. <https://doi.org/10.1.1.117.6808>.
- Wickens, Christopher D. 2002. "Situation Awareness and Workload in Aviation." *Current Directions in Psychological Science*. <https://doi.org/10.1111/1467-8721.00184>.
- Wickens, Christopher D., and Amy L. Alexander. 2009. "Attentional Tunneling and Task Management in Synthetic Vision Displays." *The International Journal of Aviation Psychology*. <https://doi.org/10.1080/10508410902766549>.
- Wickens, Christopher D., and C. Melody Carswell. 1995. "The Proximity Compatibility Principle: Its Psychological Foundation and Relevance to Display Design." *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 37 (3): 473–94. <https://doi.org/10.1518/001872095779049408>.
- Wilkinson, Leland. 2005. *The Grammar of Graphics*. Edited by Springer-Verlag New York. *Handbook of Computational Statistics*. Springer. <https://doi.org/10.1007/0-387-28695-0>.
- Williams, Jeffrey, Susan Foster, Jason Clark, Samantha Schwartz, and Aaron Pilcher. 2014.

Turbulence mitigation for touch screen systems. US Patent App. 13/652,104., issued 2014.

Wobbrock, Jacob O., Meredith Ringel Morris, and Andrew D. Wilson. 2009. "User-Defined Gestures for Surface Computing." In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/1518701.1518866>.

Wood, Erroll, Jonathan Taylor, John Fogarty, Andrew Fitzgibbon, and Jamie Shotton. 2016. "ShadowHands." In *Proceedings of the 2016 ACM on Interactive Surfaces and Spaces - ISS '16*, 77–84. New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2992154.2992169>.

Yamashita, Naomi, Katsuhiko Kajii, Hideaki Kuzuoka, and Keiji Hirata. 2011. "Improving Visibility of Remote Gestures in Distributed Tabletop Collaboration." In *Proceedings of the ACM 2011 Conference on Computer Supported Cooperative Work - CSCW '11*, 95. New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/1958824.1958839>.

Zammit Mangion, David, Loïc Bécouarn, J. Dominici, Marco Fabbri, and Joachim Bader. 2011. "A Single Interactive Display Concept for Commercial and Business Jet Cockpits." In *11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, Including the AIAA Balloon Systems Conference and 19th AIAA Lighter-Than-Air Technology Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2011-7062>.

Zillner, Jakob, Christoph Rhemann, Shahram Izadi, and Michael Haller. 2014. "3D-Board: A Wholebody Remote Collaborative Whiteboard." In *UIST 2014 - Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 471–80. New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2642918.2647393>.

