



From surface to surface -Transformations de surface tactile pour l'interaction incarnée dans le cockpit

Sylvain Pauchet

► To cite this version:

Sylvain Pauchet. From surface to surface -Transformations de surface tactile pour l'interaction incarnée dans le cockpit. Interface homme-machine [cs.HC]. ISAE - Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, 2019. Français. NNT : 2019ESAE0018 . tel-02169432v2

HAL Id: tel-02169432

<https://hal-enac.archives-ouvertes.fr/tel-02169432v2>

Submitted on 2 Sep 2019

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
Sylvain PAUCHET**

Le 12 juin 2019

**From surface to surface - Transformations de surface tactile pour
l'interaction incarnée dans le cockpit**

Ecole doctorale : **SYSTEMES**

Spécialité : **Informatique**

Unité de recherche :
Laboratoire de Recherche ENAC

Thèse dirigée par
Stéphane CONVERSY et Catherine LETONDAL

Jury

Mme Wendy MACKAY, Rapporteure
M. Martin HACHET, Rapporteur
Mme Céline COUTRIX, Examinatrice
M. Sylvain HOURLIER, Examineur
M. Jean-Luc VINOT, Examineur
M. Stéphane CONVERSY, Directeur de thèse
Mme Catherine LETONDAL, Co-directrice de thèse
Mme Nadine COUTURE, Président

RESUME

La « surface », dans les systèmes interactifs tactiles est à la fois le support du toucher et de l'image. Alors que les surfaces tactiles se sont progressivement transformées dans leur épaisseur, forme ou rigidité, la modalité d'interaction se limite, comme sur les premiers dispositifs, à une mise en contact simple du doigt avec l'écran dans un geste qui feint de manipuler ce qui est affiché. Le sens du toucher, même pour des dispositifs tactiles intégrés dans des systèmes critiques comme dans l'aéronautique ou l'automobile, reste essentiellement sollicité en tant que prolongement de la vision, pour pointer et contrôler. Alors que les théories de la phénoménologie de la perception, de la perception écologique et des interactions tangibles et incarnées reconnaissent l'importance du corps, de la motricité et des interactions avec l'environnement dans les phénomènes perceptifs, il paraît réducteur de continuer à considérer la vision comme sens premier et principal de l'interaction tactile.

Nous pensons que la transformation dynamique de la forme physique de l'interface tactile est un moyen efficace pour réincarner l'espace d'interaction tactile en utilisant mieux les capacités motrices des utilisateurs ainsi que leurs habiletés à négocier, manipuler et s'orienter dans leur environnement. A partir d'une caractérisation des risques potentiels liés au développement des interactions tactiles dans le contexte d'un cockpit d'avion de ligne (augmentation de la charge cognitive, sur-sollicitation du canal visuel, altération de la conscience de la situation, etc.), nous explorons les apports d'une interface tactile à changement de forme pour améliorer la collaboration pilotes-système au travers de la conception, la fabrication et l'évaluation de trois prototypes fonctionnels.

Avec l'étude qualitative et quantitative du prototype *GazeForm*, nous montrons que le changement de forme d'une surface tactile en fonction de la position du regard permet de diminuer la charge de travail, améliorer la performance, réduire les mouvements oculaires et améliorer la distribution de l'attention visuelle comparativement à un écran tactile classique. Par l'élaboration du concept *Multi-plié* nous mettons en évidence les dimensions et propriétés de la transformation par pliure d'une surface d'affichage interactive. Avec les évaluations qualitatives de deux dispositifs illustrant le concept, le premier présentant une série d'écrans tactiles articulés et le deuxième une surface d'affichage tactile « plissable », nous démontrons qu'une surface tactile continue pliable offre un support pertinent à l'interaction incarnée et permet d'augmenter la sensation de contrôle pour la gestion d'un système critique.

Enfin, pour généraliser la connaissance produite à d'autres contextes d'usages présentant une forte division de l'attention visuelle (conduite automobile, salle de contrôle, appareil tactile portable en mobilité) nous proposons un espace de conception pour les interfaces tactiles reconfigurables.

Mots-clés : *interaction tangible, interaction incarnée, interface reconfigurable, interface tactile, changement de forme*

ABSTRACT

The "surface" in interactive touch systems is both the support of touch and image. While over time touch surfaces have been transformed in their thicknesses, shapes or stiffness, the interaction modality is still limited, as on the first devices, to a simple contact of the finger with the screen in a gesture that pretends to manipulate what is displayed. The sense of touch, even for touch devices installed in critical systems, such as in the aeronautics or automotive fields, remains mainly used as an extension of vision, to point and control. While the theories of the phenomenology of perception, ecological perception and tangible and embodied interactions recognize the importance of the body, motor skills and interactions with the environment in perception-action phenomena, it seems simplistic to consider vision as the first and main sense of touch interaction.

We believe that dynamic transforming the physical form of the touch interface touch interface physical form is an effective way to reembody the touch interaction space by making better use of users' motor skills and their ability to negotiate, manipulate and orient themselves in their environment.

Based on a characterization of the potential risks induced by the development of touch-based interfaces in the context of airliner cockpits (increase cognitive load, overload of the visual channel, alteration of situational awareness, etc.), we explore, through the design, manufacture and evaluation of three functional prototypes, the contributions of a touch interface with dynamic shape change to improve pilots-system collaboration. With the qualitative and quantitative study of the *GazeForm* prototype, we show that changing the shape of a touch surface according to the position of the gaze makes it possible, compared to a conventional touch screen, to reduce the workload, improve performance, reduce eye movements and improve the distribution of visual attention. By developing the Multi-*plié* concept we highlight the dimensions and properties of the folding transformation of an interactive display surface. With the qualitative evaluations of the two devices illustrating the concept, the first presenting a series of articulated touch screens and the second a "pleatable" touch display surface, we demonstrate that a foldable continuous touch surface provides relevant support for embodied interaction and increases the feeling of control for the management of a critical system.

Finally, to generalize the knowledge produced to other contexts of use with a strong division of visual attention (driving, control room, portable touch device in mobility) we propose a design space for reconfigurable touch interfaces.

Keywords: *tangible interaction, embodied interaction, reconfigurable interface, touch, shape change*

REMERCIEMENTS

A l'issue de ces trois années de travail je tiens à remercier chaleureusement les nombreuses personnes qui m'ont guidé, inspiré et soutenu tout au long de ce doctorat.

Tout d'abord je tiens à remercier Yannick Jestin et Philippe Palanque qui ont favorisé ma reprise d'étude en Master 2 IHM en reconnaissant l'importance des acquis professionnels dans un parcours de vie. Je tiens aussi à remercier Stéphane Conversy pour son accueil dans l'équipe de recherche IHM de l'ENAC, ses encouragements tout au long de ce travail de thèse et ses relectures et commentaires durant la phase de rédaction.

Mes remerciements vont ensuite tout naturellement à Catherine Letondal et Jean-Luc Vinot qui m'ont intégré très tôt dans le processus de définition du projet ANR Airtius ce qui m'a permis de découvrir le monde de la recherche en IHM et qui a rendu plus concret le projet de thèse en proposant un cadre structurant et motivant. Je remercie ces deux chercheurs en IHM, toujours débordant d'énergie et de curiosité, aux parcours de vie et de formation atypiques et aux méthodes de travail parfois surprenantes, pour leurs encouragements, leurs conseils éclairants et leur bienveillance. Je tiens à adresser une pensée toute particulière à Jean-Luc qui, même affaibli par la maladie, m'a accompagné jusqu'à la fin de ce travail de recherche par ses corrections de manuscrits entre deux hospitalisations et une participation active à la soutenance de thèse. Au moment où j'écris ces lignes Jean-Luc nous a quitté, je lui dédie cette thèse.

Je remercie très sincèrement les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail. Je tiens ainsi à remercier Wendy Mackay et Martin Hachet, rapporteurs de ce manuscrit, et également Nadine Couture, Céline Coutrix, Sylvain Hourlier et Jean-Luc Vinot qui ont examiné ce travail. Je remercie l'ensemble des membres du jury pour les échanges scientifiques très enrichissants.

Merci aux membres de l'équipe d'Informatique Interactive de l'ENAC pour l'accueil, l'ambiance de travail stimulante et les différents échanges qui ont permis l'avancement de cette réflexion

Et enfin merci à mes deux filles et à Séverine qui m'ont supporté, encouragé et accompagné tout au long de ces trois années de travail exigeantes et parfois éprouvantes.

A la mémoire de Jean-Luc

PUBLICATIONS

Articles

Sylvain Pauchet, Jean-Luc Vinot, Catherine Letondal, Alexandre Lemort, Claire Lavenir, Timothée Lecomte, Stéphanie Rey, Valentin Becquet and Guillaume Crouzet. 2019. *Multi-plié: a Linear Foldable and Flattenable Interactive Display to Support Efficiency, Safety and Collaboration. Exploring and Ironing out Design Complexities with Airliner Pilots. In 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems Proceedings (CHI 2019), May 4–9, 2019, Glasgow, Scotland.*

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

Jean-Luc Vinot, **Sylvain Pauchet**, Catherine Letondal. 2019. Interfaces pilotes-systèmes tactiles des cockpits aéronautiques : risques majeurs potentiels pour la sécurité aérienne et apports possibles des TEI (Tangible Embodied Interaction). Entretiens de Toulouse, Apr 2019, Toulouse, France.

<https://hal-enac.archives-ouvertes.fr/hal-02008597v1>

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 *Proceedings of the 2018 on Designing Interactive Systems Conference 2018 - DIS '18*, Hong Kong, China, 2018, p. 1193-1205.

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

Catherine Letondal, 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 *Proceedings of the Twelfth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '18)*. ACM, New York, NY, USA, 656-666.

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

Jean-Luc Vinot, Catherine Letondal, **Sylvain Pauchet**, and Stéphane Chatty. 2016. Could tangibility improve the safety of touch-based interaction?: exploring a new physical design space for pilot-system interfaces. In *Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace (HCI-Aero '16)*. ACM, New York, NY, USA, Article 8, 8 pages.

<https://doi.org/10.1145/2950112.2964581>

Brevet

Sylvain Pauchet, Catherine Letondal, Jean-Luc Vinot. System and method for modulation of control interface feedback. France, Patent n° : EP17306543. 2018

CONTEXTE DE LA THESE

Dr. Stéphane Conversy (Directeur)

Dre. Catherine Letondal (Co-Directrice)

Dr. Jean-Luc Vinot (Encadrant)

Ce travail de recherche cofinancé par l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC) et la société Astrolab, s'inscrit dans le projet FRAE¹/ANR² Airtius sur les apports possibles des TEI (Tangible Embodied Interaction) pour la conception des interfaces pilotes-systèmes tactiles des cockpits avions.

Au cours du déroulement du projet de recherche j'ai pu bénéficier de la dynamique d'un consortium composé de 2 acteurs académiques (ENAC et ISAE³) et trois PME en design et ingénierie (Ingenuity io, Intactile et Astrolab) de la Région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée. Le travail de recherche original et personnel réalisé dans le cadre de cette thèse a profité d'un terrain d'analyse riche alimenté par de nombreuses contributions qu'il paraît nécessaire et juste de préciser. Pour la phase d'analyse de l'activité, l'animation des séances ainsi que les retranscriptions et analyses des données ont été coréalisées avec Jean-Luc Vinot (Enseignant-chercheur à l'ENAC, responsable scientifique du projet Airtius), Catherine Letondal (Enseignante-chercheuse à l'ENAC) et Stéphanie Rey (ingénieur de recherche à l'ENAC). La conception, fabrication et l'évaluation du prototype *GazeForm* ont été réalisées de façon autonome, l'analyse statistique a été coréalisée avec Mickaël Causse (enseignant-chercheur à l'ISAE). Concernant l'étude des prototypes *Multi-plié*, l'élaboration du concept a été le résultat d'un travail collectif du consortium Airtius, la conception ainsi que la fabrication des deux prototypes ont été menée avec l'aide de deux stagiaires en mécatronique et l'évaluation ainsi que l'analyse des résultats ont été coréalisées avec Jean-Luc Vinot et Catherine Letondal. Ce contexte de travail nous a offert un terrain d'analyse ethnographique et de conception de dispositifs interactifs tangibles très riche et dynamique.

¹ Agence nationale de la recherche

² Fondation de Recherche pour l'Aéronautique et l'Espace, regroupant les principaux acteurs industriels du domaine aéronautique

³ Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	1
1.1	QUESTIONS DE RECHERCHE	4
1.2	ORGANISATION DU MEMOIRE	5
2	CONTEXTE ET ANALYSE DE L'ACTIVITE	9
2.1	METHODE	10
2.2	L'ACTIVITE DE PILOTAGE D'UN AVION DE LIGNE	10
2.2.1	LES DIFFERENTES TACHES DE L'ACTIVITE DE PILOTAGE	11
2.2.2	LES PROCEDURES STANDARDS : <i>FLows</i> ET CHECKLISTS	14
2.2.3	DIMENSIONS TEMPORELLES	16
2.2.4	ENVIRONNEMENT PHYSIQUE DYNAMIQUE	16
2.2.5	MOUVEMENTS OCULAIRES ET ATTENTION VISUELLE	17
2.3	LE STATUT DU CORPS ET DE L'ESPACE DANS L'ACTIVITE DE PILOTAGE	18
2.3.1	LE STATUT DU CORPS DANS LE PROCESSUS DE PERCEPTION/ACTION DANS LE COCKPIT	18
2.3.2	L'UTILISATION DE L'ESPACE PHYSIQUE DU COCKPIT	20
2.3.3	LA PAROLE POUR EXTERNALISER	22
2.3.4	LES STRUCTURES TEMPORELLES ET RYTHMIQUES INCARNEES	22
2.3.5	SYNTHESE DES ELEMENTS DE L'ETUDE QUANTITATIVE	24
2.4	LES EVOLUTIONS DES COCKPITS DE L'AVIATION COMMERCIALE : DE L'INSTRUMENT ANALOGIQUE A LA SURFACE TACTILE	24
2.4.1	UNE DEMATERIALISATION PROGRESSIVE DES INTERFACES HOMME-SYSTEME	25
2.4.2	LE COCKPIT TACTILE : UN NOUVEAU DEFI POUR L'AERONAUTIQUE	28
2.5	COCKPIT TACTILE : DES RISQUES POTENTIELS MAJEURS POUR LA SECURITE	31
2.5.1	ATTENTION VISUELLE ET MOBILITE DU REGARD	32
2.5.2	PERFORMANCES ET CHARGE COGNITIVE	33
2.5.3	LES LIMITES DU TACTILE EN ENVIRONNEMENT DYNAMIQUE (TURBULENCES, VIBRATIONS, ACCELERATION)	34
2.5.4	POSTURES ET GESTES	34
2.5.5	COLLABORATION ET CONSCIENCE DE LA SITUATION	35
2.6	CONCLUSION	36
2.7	CONTRIBUTIONS	37
3	CADRE THEORIQUE	39
3.1	QU'EST-CE QU'UNE SURFACE TACTILE : ETUDES DES PROPRIETES DE LA SURFACE	40
3.1.1	UNE BREVE HISTOIRE DE LA SURFACE TACTILE	41
3.1.2	LES CONCEPTS ET LES PROPRIETES DE LA SURFACE DANS DIFFERENTS CHAMPS THEORIQUES	45
3.1.3	LES CONCEPTS ET PROPRIETES DE LA SURFACE TACTILE POUR L'INTERACTION	55

3.2	TRANSFORMER LA SURFACE TACTILE POUR RE-INCARNER L'INTERACTION	63
3.2.1	LA PERCEPTION INCARNEE	64
3.2.2	LE CORPS ET LA SURFACE, LES THEORIES POUR CONCEVOIR DES INTERACTIONS INCARNEES SUR SURFACE TACTILE	66
3.3	LES DIFFERENTS TYPES DE TRANSFORMATIONS DES SURFACES TACTILES	72
3.3.1	LA SURFACE TACTILE STATIQUE AUGMENTEE	72
3.3.2	LA SURFACE RECONFIGURABLE	74
3.4	CONCLUSION	79
4	METHODES ET PERIMETRE DE CONCEPTION	81
4.1	METHODE DE CONCEPTION	82
4.1.1	DES PILOTES DE L'AVIATION COMMERCIALE AU CENTRE DU PROCESSUS DE CONCEPTION	86
4.1.2	UNE EXPLORATION PAR PROTOTYPAGE ET MANIPULATION	86
4.1.3	UN ATELIER DE FABRICATION	87
4.1.4	DES PLATEFORMES DE CONCEPTION ET D'EVALUATION	88
4.2	UN PROCESSUS INCREMENTAL AUTOUR D'UN ESPACE DE CONCEPTION « PERIMETRE »	90
4.3	CONCLUSION	91
4.4	CONTRIBUTIONS	92
5	GAZEFORM : FROM SURFACE TO SURFACE POUR « LIBERER » LE REGARD	93
5.1	LE CONCEPT GAZEFORM	94
5.2	CONTEXTE ET ETATS DE L'ART	94
5.3	RAPPEL DES QUESTIONS DE RECHERCHE ET DEFINITION DES HYPOTHESES DE L'ETUDE	96
5.4	CONCEPTION	97
5.5	PRESENTATION DE LA PLATE-FORME GAZEFORM	99
5.6	PRESENTATION DE L'EXPERIMENTATION CONTROLEE	102
5.6.1	METHODE	103
5.6.2	LES TACHES	103
5.6.3	LA PROCEDURE	105
5.6.4	LES DONNEES ENREGISTREES PENDANT L'EXPERIMENTATION	105
5.6.5	ENTRETIENS AVEC LES PILOTES	106
5.6.6	ANALYSE STATISTIQUE	107
5.7	RESULTATS	107
5.7.1	LES DONNEES SUBJECTIVES	107
5.7.2	LES DONNEES OBJECTIVES DE PERFORMANCE	108
5.7.3	LES DONNEES OCULOMETRIQUES	110
5.7.4	OBSERVATIONS COMPLEMENTAIRES	111
5.8	DISCUSSION	113
5.9	CONCLUSION	116
5.10	CONTRIBUTIONS	117

6 MULTI-PLIE : FROM SURFACE TO SURFACE POUR FAVORISER LA COLLABORATION ET LA CONSCIENCE DE LA SITUATION

119

6.1	ÉTATS DE L'ART	120
6.2	METHODES	121
6.3	ANALYSE DE L'ACTIVITE	121
6.4	CONCEPTION	122
6.4.1	PREMIERE ARTICULATION D'UN CONCEPT SURFACE D'AFFICHAGE TACTILE PLIABLE	122
6.4.2	SPECIFICATION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU DISPOSITIF	122
6.5	PROTOTYPES	123
6.5.1	PLATE-FORME DE PROTOTYPAGE ET D'EVALUATION	123
6.5.2	PROTOTYPE 1 : SERIE D'ECRANS TACTILES ARTICULES	123
6.5.3	PROTOTYPE 2 : SURFACE D'AFFICHAGE TACTILE « PLISSABLE »	125
6.6	RESULTATS DES SEANCES D'EXPLORATION AVEC LES PILOTES	127
6.6.1	ACTIVITE OCULAIRE	129
6.6.2	ADAPTATION AUX BESOINS DE L'ACTIVITE, SENSATION ET NIVEAUX DE CONTROLE POUR UN SYSTEME <i>CRITIQUE</i>	131
6.6.3	CONTINUITE	134
6.7	SYNTHESE DU CONCEPT <i>MULTI-PLIE</i>	135
6.7.1	SURFACE DEVELOPPABLE CONTINUE	135
6.7.2	INTELLIGIBILITE DE LA STRUCTURE	136
6.7.3	FLEXIBILITE DU CONCEPT	137
6.7.4	INCARNATION	137
6.8	CONCLUSION	138
6.9	CONTRIBUTIONS	138

7 PROPOSITION D'UN ESPACE DE CONCEPTION DES SURFACES TACTILES RECONFIGURABLES

141

7.1	LES TAXONOMIES SUR LES INTERFACES RECONFIGURABLE	142
7.2	ANALYSE DES TRANSFORMATIONS TOPOLOGIQUES DES PROTOTYPES	144
7.3	S2s, UN ESPACE DE CONCEPTION POUR LES SURFACES TACTILES RECONFIGURABLES	152
7.4	CONCLUSION	160
7.5	CONTRIBUTIONS	161

8 CONCLUSION

163

8.1	LES OBJECTIFS DE LA THESE	163
8.2	SYNTHESE DES RESULTATS	164
8.2.1	ACTIVITE OCULAIRE	164
8.2.2	SENSATION ET NIVEAUX DE CONTROLE	164
8.2.3	CONTINUITE	165
8.2.4	OBJECTIFS THEORIQUES	166
8.3	PERSPECTIVES	167

9	BIBLIOGRAPHIE	171
10	ANNEXES	191
10.1	VOCABULAIRE AERONAUTIQUE	191
10.2	LISTE DES SEANCE D'OBSERVATIONS ET DES ATELIERS DE CONCEPTION PARTICIPATIVES	192
10.3	PUBLICATIONS	193
10.3.1	ARTICLES	193
10.3.2	BREVET	193
10.4	FIGURE DU BREVET EP17306543. 2018	194
10.5	APPLICATION WEB D'ANALYSE DE DONNEES QUALITATIVES	195
10.6	QUESTIONNAIRES POUR L'EXPERIMENTATION GAZEFORM	197

TABLE DES FIGURES

Figure 1. Fonctionnement du système <i>GazeForm</i> : Lorsque les yeux de l'utilisateur sont focalisés sur la zone d'interaction, la surface est plane et tactile (à gauche) ; lorsque le regard est sollicité par une autre tâche, la surface offre un bouton tangible saillant (à droite)	6
Figure 2. Les prototypes <i>Multi-plié</i> : a) Dessin du concept ; b) prototype 1 : série d'écrans tactiles articulés ; c) prototype 2 : surface d'affichage tactile « plissable »	7
Figure 3. Les différents panneaux d'instruments dans le poste de pilotage de l'airbus A350 : 1/ Side-Stick, 2/ Main Instrument Panel, 3/ Glareshield, 4/ Overhead Panel, 5/ Pedestal	11
Figure 4. Instruments utilisés pour la tâche de pilotage sur l'Airbus A350 : 1/ <i>Sidestick</i> , 2/ <i>Primary Flight Display</i> , 3/ <i>Rudder Pedals</i> , 4/ <i>Speed Brake Lever</i> , 5/ <i>Flaps Lever</i> , 6/ <i>Thrust Levers</i> , 7/ <i>Landing Gear Lever</i>	12
Figure 5. Instruments utilisés pour la tâche de navigation sur l'Airbus A350 : 1/ <i>Navigation Display</i> , 2/ <i>Electronic Flight Instrument System Control Panel</i> 3/ <i>Multi-Function Display</i>	12
Figure 6. Instruments utilisés pour la tâche de communication sur l'Airbus A350 : 1/ <i>Radio Management Panel</i> , 2/ <i>Multi-Function Display</i>	12
Figure 7. Instruments utilisés pour la tâche de gestion des systèmes sur l'Airbus A350 : 1/ <i>Overhead panel</i> , 2/ <i>Multi-Function Display</i> 3/ <i>Keyboard and Cursor Control Units</i>	13
Figure 8. Les zones de responsabilités et le sens de réalisation du flow en fonction du rôle et du grade	14
Figure 9. After Start Flow sur A320. Procédure à réaliser après le démarrage des moteurs et avant le roulage. A gauche en jaune le flow du Pilot Monitoring et à droite en vert le flow du Pilot Flying	15
Figure 10. Exemples de check-list : 1/ sur le yoke du Boeing 737, 2/ sur écran et 3/ au dos du QRH	16
Figure 11. Représentation schématique d'une série de fixations et <i>dwells séparés par des saccades</i>	17
Figure 12. Utilisation des propriétés de la forme des contrôleurs physiques : a) volets ; b) APU ; c) frein de parking.	19
Figure 13. Gestes pour percevoir : a) contrôle de l'over Head ; b) contrôle des speed brake.	19
Figure 14. Flow (circuit visuel) effectué lors d'une séance d'observation sur simulateur	21
Figure 15. Illustration de l'enchaînement rythmé de gestes. Réalisation Claire Lavenir	23
Figure 16. De l'instrument analogique à la surface tactile a/ Cockpit de la SE 210 Caravelle ; b/ Cockpit tactile du Boeing 777X	25
Figure 17. <i>Classic Cockpit</i> – Concorde (1965 – 1979)	26
Figure 18. Première génération de <i>Glass Cockpit</i> – Boeing 757	26
Figure 19. Deuxième génération de <i>Glass Cockpit</i> – Airbus A320	27
Figure 20. <i>Interactive Cockpit</i> – Airbus A350	28
Figure 21. Vue artistique du cockpit ODICIS avec un écran tactile continue (à gauche) <i>Interface tactile du projet Avionics 2020</i> (à droite)	29
Figure 22. Interaction tactile sur le PFD – Proline Fusion sur Beechcraft King Air (à gauche) <i>Overhead Panel tactile de Honeywell sur Gulfstream G500</i> (à droite)	30

Figure 23. Interaction tactile avec stabilisation de la main sur le bord de l'écran - G500 (à gauche) <i>Panneaux de boutons physiques permettant d'agir sur les écrans tactiles - G500 (à droite)</i>	30
Figure 24. Actions sur le système sans le regard. A gauche, le PM règle les volets en surveillant l'extérieur. A droite le PF dirige l'avion au sol avec la main gauche sur le <i>Steering Handwheel</i> et contrôle le réglage des volets avec la main droite tout en regardant l'environnement extérieur	32
Figure 25 : Pilotes utilisant l'environnement physique comme support à l'action. A gauche, réglage progressif d'un cap au FCU en gardant la main sur le bouton. A droite, attente de l'ordre de réglage de l'APU avec la main appuyée sur la manette des volets et le doigt sur le bouton APU.....	35
Figure 26. Écran tactile du PLATO IV, 1972 (à gauche) ; deuxième génération des écrans « AccuTouch » (à droite) ;	41
Figure 27. Schéma de principe de fonctionnement des dispositifs Flexible Machine Interface et ReactTeable (à gauche) ; le cadre optique SensorFrame (à droite).....	42
Figure 28. DigitalDesk ; une vue du dispositif dans son ensemble (à gauche); un exemple d'interaction tactile (à droite)	43
Figure 29. Table tactile MERL avec une surface capacitive et un système de boucle radio pour discriminer les utilisateurs en contact avec la surface (à gauche) ; Schéma de fonctionnement de la table Microsoft Surface T1 (à droite)	43
Figure 30. Schéma de fonctionnement du dispositif de Jeff Han (à gauche) ; éclaté des différentes couches du système intégré à la table samsung SUR40 (à droite)	44
Figure 31. Écran souple tactile LG (à gauche) ; intégration d'un capteur d'empreinte sous l'écran du Samsung S10 (à droite)	45
Figure 32. Modification du flux optique par le mouvement de l'observateur ; Des surfaces de la table apparaissent, certaines sont masquées et d'autres restent inchangées (Gibson, 1979)	47
Figure 33. Façade de la Villa Moller à Vienne (Adolphe Loos – 1928) (à gauche) ; fenêtre en bande de la « petite maison » de Le Corbusier (1923) permet de domestiquer la vue extérieure (à droite).	49
Figure 34. La façade de la fondation Cartier (Paris 1994) créée par Jean Nouvel	50
Figure 35. Aegis Hypo-Surface de l'atelier dECOi (à gauche) ; Vue 3D du bâtiment Milestone (à Esslingen en Allemagne) de l'agence MVRDV (à droite)	51
Figure 36. Malevitch, Carré blanc sur fond blanc, 1918, huile sur toile, Moma de New-York (à gauche) ; Lucio Fontana, Concetto spaziale, attese, 1965 (à droite)	53
Figure 37. Steven Parrino, rétrospective Palais de Tokyo - 2017	53
Figure 38. Anatomie de la peau et récepteurs ; 1) corpuscules de Meissner ; 2) corpuscules de Ruffini ; 3) corpuscules de Vater-Pacini ; 4) cellules de Merkel ; 5) terminaisons nerveuses libres	56
Figure 39. Évolution des technologies d'affichage et développement des interfaces utilisateurs	59
Figure 40. Exemples de surfaces interactives ; 1) SmartSkin de (Rekimoto, 2002) ; 2) PaperWindows de (Holman et al., 2005) ; 3) One Reality de (Roo and Hachet, 2017)	59
Figure 41. Les six postures étudiées par (Bachynskyi et al., 2015)	62

Figure 42. A gauche) maquette physique (1/2 cockpit, en position assise droite avec 8 écrans tactiles) ; à droite) zones d'accessibilité pour une interaction tactile en fonction de la norme ISO 7250	63
Figure 43. Modèle MVC et MCRit, reproduit et traduit de (Ullmer, 2002)	69
Figure 44. Boucles de rétroaction des TUIs, reproduit et traduit de (Ishii, 2008)	70
Figure 45. Framework des interactions tangibles (Hornecker and Buur, 2006)	72
Figure 46. La surface statique augmentée ; a) Guides pour actions tactiles ; b) DataTiles ; c) Guides physiques pour limiter les effets des tremblements	73
Figure 47. La surface reconfigurable ; a) Boutons gonflables ; b) GelTouch ; c) MorePhone	74
Figure 48. Études sur les surfaces articulés ; a) Paperfold : les tuiles articulées ; b) Modification de la forme d'un bureau ; c) Tilt Display	75
Figure 49. Exemples de surfaces souples ; a) Écran enroulable Xpaaand ; b) Flexpad, transformation d'une feuille en afficheur portable.....	76
Figure 50. Les surfaces élastiques 2.5D ; a) Obake, écran souple pour manipuler des informations topographiques ; b) Étude de l'utilisation de l'élasticité en entrée ; c) Une surface en lycra fixée sur une matrice d'actuateurs linéaires	76
Figure 51. Études sur les surfaces émergentes ; a) Lumen b) Table tangible Transform ; c) Concept Emergeable.....	77
Figure 52. Séances d'observations in-situ ; a) Entretien contextuel dans un avion léger au sol ; b) Séance d'observation sur le simulateur A320 de l'ENAC.....	82
Figure 53. Types de gestes observés ; a) Gestes croisés ; b) Geste déictique ; c) Geste de contrôle ; d) Geste de collaboration ; e) Geste de préparation à l'action ; f et g) Postures de stabilisation	83
Figure 54. Citation extraite des observations codée par thèmes (à gauche) ; enveloppes permettant de classer les citations par thèmes (à droite).....	83
Figure 55. Exemple de codage de citations dans l'outil d'analyse de données qualitatives	84
Figure 56. Exemples de dessins de conception ; concept <i>Multi-plié</i> (à gauche) ; boutons émergents (à droite), réalisation Claire Lavenir.	85
Figure 57. Mur d'idées, résultat d'une séance de conception.....	85
Figure 58. Séances d'évaluation ; a) Prototypage vidéo de <i>GazeForm</i> présenté aux pilotes ; b) Enregistrement d'un prototype vidéo autour du concept <i>Multi-plié</i> sur le cockpit en carton	86
Figure 59. Exemples de prototypes réalisés en fin de séances de brainstorming	87
Figure 60. Évolution des maquettes du concept <i>Multi-plié</i>	87
Figure 61. Atelier de fabrication ; a) Imprimante 3D Ultimaker ; b) Matériel pour montage électronique	88
Figure 62. Le cockpit en carton utilisé comme support à la conception.....	89
Figure 63. Le cockpit en bois ; en cours de fabrication (à gauche) ; en utilisation pour l'évaluation <i>Multi-plié</i> (au centre) ; modèle 3D pour la fabrication avec (1) écrans courbes de 34 pouces, (2) projecteur, (3) zone d'intégration des prototypes (à droite).....	89
Figure 64. Espace de conception d'interaction tangible et incarnée pour le cockpit.....	91
Figure 65. Concept <i>GazeForm</i> ; lorsqu'il existe une coordination œil-main pour la modalité tactile, la surface est plane (en haut) ; lorsque le regard est sollicité par une autre tâche, la surface offre un contrôle tangible saillant permettant une continuité de manipulation et libérant le regard (en bas).	94

Figure 66. Dessin et prototype de l'idée de boutons émergeant ; dessin du principe de mise en saillance de boutons en fonction de l'état du système (à gauche) ; prototype carton utilisé pour la première évaluation avec un pilote (à droite)	98
Figure 67. Prototypes du concept <i>GazeForm</i> ; Dessin du concept (à gauche) ; Prototype vidéo présenté à la séance de design Walkthrough (à droite)	98
Figure 68. Plate-forme <i>GazeForm</i> avec écran tactile frontal (1), surface transformable inférieure (2) et système d'oculométrie (3)	99
Figure 69. La surface inférieure : (1) Système Airbar®, (2) Zone d'affichage et d'interaction, (3) Boutons rotatifs rentrés, (4) Tags pour le système d'oculométrie	100
Figure 70. Système d'actuation des boutons rotatifs : (1) manivelle, (2) servomoteur, (3) bielle, (4) guide de déplacement linéaire, (5) bouton rotatif sorti, (6) surface, (7) bouton rotatif rentré	101
Figure 71. Composition des blocs de tests	103
Figure 72. Détails des tâches et sous-tâches : (1) Position du participant et disposition des zones d'interaction. (2) Étapes de la tâche de pointage (3) Étapes de la tâche de réglage (4) Étapes de la tâche de slider	104
Figure 73. Interface de configuration permettant de régler : le délai avant émergence / rétraction ; la vitesse d'émergence / rétraction ; et les modes, entièrement manuel, mixte, ou entièrement automatique.	106
Figure 74 - Moyenne des six scores des sous-échelles NASA-RTLX pour l'entrée <i>GazeForm</i> et l'entrée Tactile. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.	107
Figure 75. Score SUS moyen pour l'entrée <i>GazeForm</i> et l'entrée Tactile. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.	108
Figure 76. Temps d'exécution moyens de la tâche de réglage en entrée <i>GazeForm</i> et Tactile sur les 3 niveaux de difficulté de réglage et les 2 niveaux de difficultés de surveillance. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.....	108
Figure 77. Temps de réaction moyens pour l'entrée <i>GazeForm</i> et Tactile à travers les 3 niveaux de difficulté de la tâche de réglage et les 2 niveaux de difficultés de la sous-tâche de surveillance. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne	109
Figure 78. Délais de reprise de tâches pour les entrées <i>GazeForm</i> et Tactile. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.....	110
Figure 79. Pourcentages moyens du temps passé à regarder l'écran principal avant pour les entrées <i>GazeForm</i> et Tactile sur les 3 niveaux de difficulté de la tâche de réglage et les 2 niveaux de difficultés de la sous-tâche de surveillance. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.....	110
Figure 80. Nombre moyen de transitions entre l'écran avant principal et l'écran inférieur pour les entrées <i>GazeForm</i> et Tactile sur les 3 niveaux de difficulté de la tâche de réglage et les 2 niveaux de difficulté de la sous-tâche de surveillance. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.....	111
Figure 81. Explorations avec les pilotes. a) geste de dôme ; b) Feedback graphique avant d'aplatir un bouton ; c) commandes FCU dans les séquences visuelles ; d) réglage des délais avec le panneau de commande ; e) brainstorming sur les nouvelles commandes <i>GazeForm</i> ; f) commandes sans les yeux.	113
Figure 82. Dessin de principe du concept <i>Multi-plié @Claire Lavenir</i>	119
Figure 83. b. Prototype de la série d'écrans articulés, c. Prototype de la surface d'affichage tactile plissable.	120

Figure 84. Exemples de prototypes papier, carton et plastique du concept <i>Multi-plié</i>	122
Figure 85. La plate-forme de prototypage et d'évaluation avec le prototype <i>Multi-plié</i> 1 positionné dans la partie centrale (<i>Cockpit Pedestal</i>).	123
Figure 86. a) série d'écrans articulés composée de 2 modules (A et B). Chaque module est composé de deux écrans tactiles 7" (1), d'un microcontrôleur Arduino (2) et de 2 actionneurs linéaires (3) b) le dispositif interactif d'afficheurs articulés en action, intégré à notre plate-forme de test.	124
Figure 87. Surface d'affichage tactile plissable ; a) Vue en coupe des différents états de la surface d'affichage plissable. (1) plat, (2) 1 demi pli positif, (3) 1 pli positif, (4) Carte tactile, (5) microcontrôleur Arduino ; b) surface plissable en cours de tests, avec projection vidéo des informations.	125
Figure 88. Schéma de déformation de la surface tactile plissable ; 1) Positions des différents points de déformation avec la surface complètement aplatie, 2) Positions des différents points de déformation avec les sommets S1 et S2 en position pliée.	125
Figure 89. Vue de dessus de la surface plissable ; 1) PLA conducteur intégré dans le PLA blanc (zones en pointillées) ; 2) partie supérieure de la surface non tactilisée.	126
Figure 90. a) Affichage d'une carte complémentaire en dessous d'un point de passage (prototype <i>Multi-plié</i> P2); b) Schéma des systèmes coupé par les bords des écrans (prototype <i>Multi-plié</i> P1); c) Des pages systèmes structurés par la forme et la disposition des écrans (prototype <i>Multi-plié</i> P1).	130
Figure 91. Prototype <i>Multi-plié</i> P2 : a) tentative de déformer le pli pour créer un rappel, b) Déplacement du doigt par glissé sur la surface continue	130
Figure 92. Discussions avec les pilotes concernant l'ergonomie des dispositifs <i>Multi-plié</i> : Stabilité de la main (a), (b) et (c) ; référence spatiale (d)	131
Figure 93. Idées d'interactions proposées par les pilotes : a) geste pour déplacer l'interface sur un espace partagé, b) geste pour ramener l'interface vers soit	134
Figure 94. Interactions proposées par le système pour agir sur les plis : a) réglage de l'inclinaison avec le slider position relative ; b) Utilisation du bouton + et - ; c) action tactile sur le sommet d'un pli pour le replier	135
Figure 95. Les 8 types de transformation de la taxonomie de (Rasmussen et al., 2012)	143
Figure 96. Les caractéristiques de la taxonomie de (Roudaut et al., 2013) mis à jour par (Kim et al., 2018)	143
Figure 97. Caractérisation des prototypes <i>GazeForm</i> , <i>Multi-plié</i> P1 et P2 par rapport à la taxonomie de (Kim et al., 2018)	145
Figure 98. Vue de profil de la transformation de taille du prototype <i>Multi-plié</i> P2	146
Figure 99. Vue CAO avec des faces NURBS du prototype <i>Multi-plié</i> P2	147
Figure 100. Schéma de la modification du flux optique par le plissage de la surface <i>Multi-plié</i> ; les surfaces pointillés (2) se dérobent au regard masqué par les bords occlusants qui apparaissent comme des invariants du flux et renseignent des actions possibles (affordances) .	157
Figure 101. Caractérisation des prototypes <i>GazeForm</i> , <i>Multi-plié</i> P1 et P2 dans l'espace de conception s2s.	160
Figure 102. Simulateur cockpit dynamique, 6 degrés de liberté, pour le test des dispositifs en contextes dégradés (ex. turbulences, vibrations, accélérations)	168

1 INTRODUCTION

« Toute connaissance est la perception d'une figure sur un fond. Elle doit s'entourer d'un halo de non connu ou de moins connu, d'une marge d'inattention, qui n'est pas un supplément mais un élément essentiel » (Merleau-Ponty, 1968)



Susumu Koshimizu, From Surface to Surface 1971, remade 1986

« *From surface to surface* » est le titre d'une œuvre de Susumu Koshimizu de 1971 présentée récemment à la Tate Modern : une réflexion sur la matière et l'essence d'un objet par la modification de ses surfaces par découpes ; une modification de la forme originelle de la planche de bois par soustraction de matière et création de sous-surfaces qui d'après l'artiste ne modifient pas la perception que l'on avait de la surface globale « *si vous prenez une vue très large (de l'objet découpé), je pense que l'ensemble est vu comme présentant une surface inchangée* ». Ce jeu d'échelle de la surface par transformation fait partie des questionnements de notre travail de recherche ; nous avons pour notre part interrogé la surface tactile, en la perçant, l'articulant, la plissant pour faire émerger des propriétés particulières favorisant l'interaction tactile tout en essayant de

préserver l'essence même de la surface d'affichage d'origine capable d'actualiser une collection infinie d'information sur un même espace de visualisation (Lellouche, 1996). Créer de la surface pour guider, s'accrocher, se reposer, percevoir et revenir à la surface d'affichage tactile homogène et continue ; transformer la surface pour l'adapter à un contexte sans briser la continuité et l'homogénéité de l'interaction ; générer des sous-surfaces sans altérer la continuité de l'ensemble. Passer de la généricité et de la plasticité de la surface de pixels « amnésique » (Seux, 2014) à une interface polymorphe qui donne accès à un espace matériel d'informations dans un jeu infini entre le monde, l'image et les limites de l'écran. Ainsi l'image n'est plus une représentation mais devient un instrument (Poissant and Tremblay, 2011).

La surface, dans les systèmes interactifs tactiles est à la fois le support du toucher et de l'image. De la dalle de verre du système résistif « *AccuTouch* » de Elographics® (1977) à la surface plastique souple du smartphone pliable en passant par les mini-surfaces circulaires des montres connectées, la taille et la forme des dispositifs tactiles se sont adaptés pour sortir du confinement du cadre professionnel ou universitaire et s'inscrire, au travers de multiples dispositifs physiques, dans l'environnement quotidien et la mobilité des individus (informatique ubiquitaire (Weiser, 1991)). Alors qu'au fil du temps les surfaces tactiles se sont transformées dans leurs épaisseurs, formes, rigidité la modalité d'interaction se limite, comme sur les premiers dispositifs (Johnson, 1965), à une mise en contact simple du doigt avec l'écran dans un geste qui feint de manipuler ce qui est affiché. Le sens du toucher, même pour des dispositifs tactiles installés dans des systèmes critiques⁴, comme dans l'aéronautique ou l'automobile, reste essentiellement sollicité en tant que prolongement de la vision, pour pointer et contrôler (cockpit tactile du Boeing 777X ou tableau de bord écran des voitures Tesla®).

L'écran tactile, dans ce type de mise en œuvre, semble « faire écran » au corps percevant en n'offrant qu'une utilisation sensoriellement pauvre du système haptique (Gibson, 1966) et en limitant le corps de l'utilisateur à un œil prolongé d'un doigt (O'Sullivan and Igoe, 2004). Alors que les théories de la perception, de la Gestalt (Köhler, 1920), (Koffka, 1922) à la perception écologique de (Gibson, 1979) en passant par la phénoménologie de la perception de (Merleau-Ponty, 1942), se sont accordées sur l'importance du corps, des mouvements et des interactions avec l'environnement dans les phénomènes perceptifs, il paraît réducteur voir dangereux dans certains contextes de rester dans un cadre théorique de la vision comme sens premier et principal de l'interaction tactile. Nous proposons par notre travail de recherche de déplacer ce cadre théorique en intégrant le corps entier en mouvement dans son environnement pour repenser la surface d'interaction tactile. En repartant de ce corps comme point névralgique du système de perception, nous utilisons les théories du domaine de l'interaction homme-machine autour des interfaces tangibles (TUI), de l'interaction tangible

⁴ Système dont la défaillance, le mauvais fonctionnement ou l'erreur de conception peut entraîner des atteintes graves aux personnes, des destructions d'équipements ou des dommages environnementaux (Wikipédia, 2016)

et des interactions incarnées (TEI) pour reconcevoir la surface tactile ; pour « ré-incarner » l'espace d'interaction tactile ; pour passer de la surface qui fait écran, à la surface qui implique les compétences motrices et la connaissance du monde physique des utilisateurs ; pour passer de la surface frontière à la surface inclusive.

Nous proposons ainsi de questionner la surface tactile dans sa forme, sa matérialité et sa profondeur sans nous limiter à des effets de surfaces ou des simulations de sensations haptiques, déjà étudiés dans de nombreux projets de recherche (MISAC 2012⁵ ou FUI TOUCHIT⁶). Une étude de la forme et de la transformation de la surface tactile pour guider, supporter, stabiliser, structurer les processus de perception et d'action ; stimuler le système perceptif tactilo-proprio-kinesthésique (TPK) pour diminuer la sollicitation du canal visuel et améliorer la sensation et le niveau de contrôle.

C'est dans le contexte aéronautique et plus particulièrement dans le cadre d'une étude sur l'évolution des interfaces pilotes-systèmes liée au développement des écrans tactiles dans les cockpits de l'aviation commerciale, que nous avons identifié le terrain d'étude pour « re-penser » la surface d'interaction tactile. Dans cet environnement de travail où le corps est décrit par les pilotes eux-mêmes, comme un instrument pour percevoir et améliorer la sensation de contrôle et où l'espace du cockpit et les instruments physiques sont considérés comme un support indispensable à l'externalisation et à la conscience de la situation. L'introduction récente de nouvelles surfaces interactives plates, rigides et lisses prive les pilotes d'un canal informationnel important. Même si ces surfaces d'affichage tactiles présentent certains avantages, d'une part pour les pilotes : manipulation directe de l'information (Barstow, 2012) (Avsar et al., 2016a), visualisation de données agrégées sur des surfaces d'affichages étendues (Garcia-Ruiz, 2013), amélioration de la gestion des ressources cognitives (Hourlier, 2015), et d'autre part pour les industriels : flexibilité, généricité, optimisation des coûts de développement et de maintenance. Elles ont pour effet d'augmenter la charge cognitive (Eren et al., 2018) et présentent de sérieuses limites pour la gestion de systèmes critiques. Contrairement aux commandes physiques, manipulables sans recourir à la vision grâce au sens tactilo-proprio-kinesthésique (TPK), les écrans tactiles sollicitent fortement le canal visuel (Buxton et al., 1985) (Tory and Kincaid, 2013) (Harrison and Hudson, 2009), ne favorisent pas la conscience mutuelle et la collaboration de l'équipage (Cohen and McGee, 2004) (Speelpenning et al., 2011), et ne sont pas sûrs et performants dans des environnements dynamiques soumis aux vibrations et aux accélérations (Lin et al., 2010) (Ahmad et al., 2018) (Ng and Brewster, 2016) (Cockburn et al., 2017). La mise en lumière des limites des interactions sur surfaces tactiles par l'étude d'un domaine d'application présentant des exigences de performance et de sécurité nous a permis de fonder notre travail de reconception de la surface. En partant d'un périphérique existant (écran tactile présentant une surface plate et rigide) et en le confrontant à ce domaine d'activité nous avons initié un processus de

⁵ Multimodal Interaction Surfaces for Aerospace and Automotive Cockpits

⁶ Tactile Open Usage with Customized Haptic Interface Technology

redéfinition de la surface tactile d'interaction. Processus qui s'articule autour de trois axes principaux de recherche pour lesquels nous avons spécifié des questions de recherche particulières que nous utilisons pour guider notre réflexion sur la réincarnation de l'interaction par transformation de la surface tactile.

1.1 QUESTIONS DE RECHERCHE

– Quels sont les effets de la transformation sur l'activité oculaire ?

L'interface tactile reconfigurable permet-elle de réduire la demande d'attention visuelle, améliorer la distribution de l'attention, libérer l'attention visuelle de manière flexible en cas de besoin, réduire les interruptions dans les circuits visuels de surveillance et favoriser la continuité de la surveillance suivant un rythme régulier, homogène et contrôlé ? Pour les questions sur l'activité oculaire nous chercherons à savoir comment la transformation de la surface comme fond à la surface comme figure rend possible l'interaction sans les yeux (guidage et support à l'action tactile, forme saisissable et manipulable, etc.) et comment elle permet de favoriser la perception visuelle (structure, mouvement, congruence entre forme et contenu 2D, etc.).

– Quels sont les effets de la transformation sur la sensation et les niveaux de contrôle pour un système critique ?

La surface tactile reconfigurable permet-elle d'améliorer la performance (taux d'erreur faible, robustesse à l'interruption, temps d'exécution plus rapide). La structure de la déformation et les propriétés des transformations (vitesse, amplitude, etc.) permettent-elles de favoriser la perception des notifications et alarmes, supporter la programmation et le déroulement de séquences d'actions, et améliorer la hiérarchisation des priorités ? La création d'un instrument physique (support de l'image) par les transformations momentanées de la surface favorise-t-elle la sensation de contrôle ?

– Continuité

La transition d'un état de forme à l'autre, de la surface globale à la surface locale, permet-elle une interaction suffisamment fluide et continue ? Comment concevoir la continuité de la surface et des transformations pour supporter les interactions continues ? Comment concevoir les transformations pour assurer la continuité entre les tâches à réaliser (ex. réglage, surveillance, collaboration) et entre les modalités d'interaction offertes (ex. tactile, tangible) ?

Pour explorer ces questions de recherche nous faisons l'hypothèse que la transformation d'une surface tactile permet de répondre aux exigences de performance et de sécurité pour des contextes d'usage dégradés (ex. turbulences, vibrations, fumée dans le cockpit, stress et charge cognitive élevée) ainsi que des contextes d'interaction présentant une forte contrainte de division de l'attention visuelle. Nous supposons que comparativement à un écran tactile

présentant une surface plate et rigide, la transformation de la surface d'interaction permettra de réduire la charge de travail, d'améliorer la distribution de l'attention visuelle, de favoriser la collaboration et d'améliorer la performance. Ces questions de recherche et hypothèses sont explorés dans les études *Gaze-Form* et *Multi-plié*, présentées dans les chapitres 5 et 6 ; les résultats de chaque étude sont discutés suivant les trois axes de recherche (Activité oculaire, Sensation et niveau de Contrôle, Continuité).

Enfin, pour s'extraire du contexte d'étude et pouvoir généraliser la connaissance produite à d'autres environnements nous analysons les transformations topologiques des 3 interfaces tactiles reconfigurables avec des outils théoriques du domaine de l'interaction homme-machine. Puis en articulant ces résultats avec les théories de la perception et de l'interaction incarnée (étudiées dans le chapitre 3) nous proposons un espace de conception pour les interfaces tactiles reconfigurables utilisables dans un contexte d'activité avec une forte division de l'attention visuelle (pilotage, conduite, contrôle aérien en tour, appareil tactile portable en mobilité, etc.). Espace de conception que nous appellerons *s2s*, pour « surface to surface », dans la suite de ce document.

1.2 ORGANISATION DU MEMOIRE

Ce mémoire est divisé en 6 chapitres présentant le contexte, le cadre théorique, la méthodologie, deux études (quantitative et qualitative) autour des prototypes « *From Surface to Surface* » et une discussion des résultats des évaluations avec la proposition d'un espace de design.

Chapitre 2. Ce chapitre présente l'activité prescrite de pilotage d'un avion de ligne actuelle (tâches, procédures, environnement). Il décrit en quoi l'activité vécue implique le corps des pilotes dans la perception/action et dans quelle mesure l'environnement physique du cockpit est essentiel pour maintenir un haut niveau de performance des pilotes. Ensuite il présente les évolutions majeures des interfaces pilotes-systèmes du cockpit supportant ces activités et l'apparition récente des écrans tactiles. Enfin, en confrontant les exigences clés d'une activité aux inconvénients des interactions sur surfaces tactiles il met en évidence les risques potentiels majeurs de cette évolution des cockpits pour la gestion d'un système critique. A partir de ces problèmes d'utilisabilité des systèmes tactiles pour la gestion d'un système critique avec une forte division de l'attention visuelle il résume les questions de recherche émergentes classées suivant les trois axes de recherche (Activité oculaire, Sensation et niveau de Contrôle, Continuité).

Chapitre 3. Ce chapitre présente le contexte théorique du projet de recherche. Tout d'abord, il retrace au cours du temps les évolutions structurelles et fonctionnelles de la surface d'interaction tactile. Puis il expose des propriétés, attributs, principes de la surface dans différents champs théoriques (psychologie de la perception, architecture, peinture et cinéma). Ensuite il évoque les concepts et propriétés de la surface tactile dans le domaine de l'interaction homme-

machine et souligne les faiblesses des pratiques actuelles qui n'utilisent pas la richesse du système tactilo-proprio-kinesthésique (TPK) dans la conception des interfaces. Pour répondre à ces faiblesses il propose un éclaircissement sur la place du corps dans les phénomènes de perception ainsi que dans les théories de l'interaction. Enfin il expose une synthèse du travail de recherche documentaire sur les interactions tactiles sur surfaces statiques augmentées et sur surfaces reconfigurables.

Chapitre 4. Ce chapitre présente les méthodes de conception mises en œuvre pour le développement des prototypes présentés dans les chapitres 5 et 6. Il décrit les méthodes d'analyse de l'activité, de conception centrée sur l'utilisateur (UCD) et d'évaluation. Il présente l'importance de l'utilisation des prototypes manipulables et des plateformes d'évaluation dans le processus de conception. Enfin il expose succinctement la première version d'un espace de design sur les apports des interactions tangibles et incarnées pour le cockpit ; espace de design défini autour des exigences du contexte d'étude, utilisé comme délimitation d'un périmètre de travail dans notre approche de conception.

Chapitre 5. Ce chapitre présente l'étude quantitative et qualitative du système *GazeForm : from Surface to Surface* pour libérer le regard ; *GazeForm* est une interface tactile dynamiquement reconfigurable en fonction de la position du regard (Figure 1).

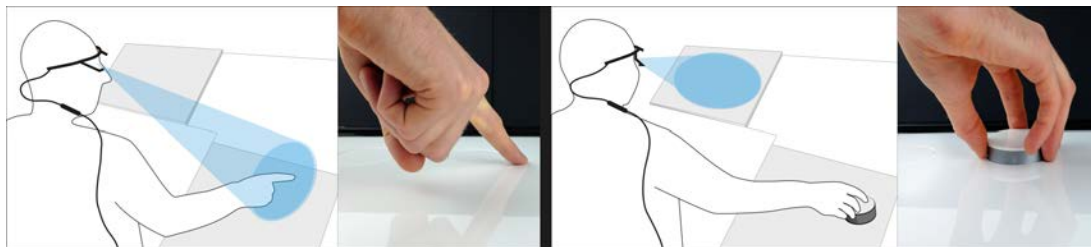


Figure 1. Fonctionnement du système *GazeForm* : Lorsque les yeux de l'utilisateur sont focalisés sur la zone d'interaction, la surface est plane et tactile (à gauche) ; lorsque le regard est sollicité par une autre tâche, la surface offre un bouton tangible saillant (à droite)

Nous débutons par une description du concept et par un rappel des questions de recherche autour des 3 axes (Activité oculaire, Sensation et niveau de Contrôle, Continuité). Nous poursuivons par une présentation de la phase de conception participative menée avec les pilotes puis nous décrivons le fonctionnement du système, la méthodologie de l'expérimentation contrôlée et des entretiens avec les pilotes. Enfin nous discutons les résultats de l'étude en analysant les effets de la transformation de la surface tactile suivant les trois axes de recherche (Activité oculaire, Sensation et niveau de Contrôle, Continuité).

Chapitre 6. Ce chapitre présente le concept et l'étude qualitative du système : *Multi-plié, from Surface to Surface* pour favoriser la collaboration et la conscience de la situation. Il décrit la conception et la mise en œuvre de deux prototypes interactifs réalisés (prototype 1 : série d'écrans tactiles articulés et prototype 2 : surface d'affichage tactile « plissable »), la plateforme d'intégration et la méthodologie d'évaluation.

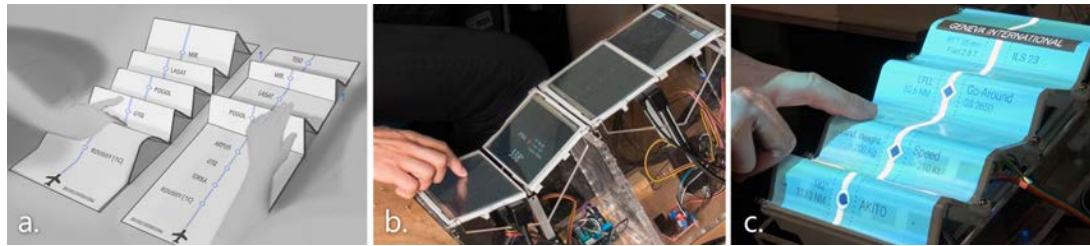


Figure 2. Les prototypes *Multi-plié* : a) Dessin du concept ; b) prototype 1 : série d'écrans tactiles articulés ; c) prototype 2 : surface d'affichage tactile « plissable »

Enfin il présente une analyse des commentaires issus des séances d'évaluation avec les pilotes en reprenant les trois axes des questions de recherche (Activité oculaire, Sensation et niveau de Contrôle, Continuité) ; et pour terminer il propose une synthèse du concept *Multi-plié*.

Chapitre 7. Ce chapitre présente une proposition d'espace de conception pour les surfaces tactiles reconfigurables. Il expose une caractérisation des propriétés physiques de transformation des trois interfaces tactiles reconfigurables évaluées dans les chapitres 5 et 6. À partir des données issues de l'analyse de l'activité, du contexte théorique, des résultats des évaluations des prototypes *GazeForm* (chapitre 5) et *Multi-plié* (chapitre 6), il détaille les principes de design d'un espace de conception pour les interfaces tactiles reconfigurables.

2 CONTEXTE ET ANALYSE DE L'ACTIVITE

De la surface instrumentale physique à la surface tactile,
une désincarnation de l'espace d'interaction

Le monde dans lequel nous acquérons des compétences pratiques en tant qu'agents incarnés est le même univers qui nous soumet à l'hétéronomie des choses et aux périls de la réalité matérielle. Nourrir le fantasme d'échapper à l'hétéronomie par le biais de l'abstraction, c'est renoncer à toute compétence pratique et substituer à notre capacité d'agir les solutions magiques de la technologie.
(Crawford, 2016, p. 103)

Dans le cadre de ce travail de recherche nous nous sommes intéressés à la modification des interfaces humains-systèmes dans les postes de pilotage des avions de ligne. En effet, l'évolution technologique des cockpits aéronautiques est caractérisée par une dématérialisation progressive des interfaces et notamment par la suppression programmée de nombreux actionneurs physiques, rendue possible par l'utilisation d'écrans tactiles permettant une interaction directe avec les données des systèmes avioniques. Cette évolution des dispositifs interactifs pilotes-systèmes pose des problèmes potentiels majeurs et de nombreuses questions d'utilisabilité et de sécurité. Dans cette section, nous commencerons, par une présentation succincte de l'activité prescrite de pilotage d'un avion de ligne actuel (tâches, procédures, environnement). Puis dans un deuxième temps nous identifions en quoi l'activité vécue implique le corps des pilotes dans la perception/action et dans quelle mesure l'environnement physique du cockpit (la spatialisation des fonctionnalités et la forme des interacteurs) est essentiel

pour maintenir un haut niveau de performance des pilotes. Ensuite nous abordons les évolutions majeures au cours du temps des interfaces pilotes-systèmes et l'apparition récente des écrans tactiles. Enfin, en confrontant les exigences clés d'une activité aux inconvénients des interactions sur surfaces tactiles nous mettons en évidence les risques potentiels majeurs de cette évolution des cockpits pour la gestion d'un système critique. Que ce soit en contexte d'usage dégradé (ex. turbulences, vibrations, fumée dans le cockpit, stress et charge cognitive élevée) ou en situation d'interaction présentant une forte contrainte de division de l'attention visuelle (ex. circuits visuels de surveillance des systèmes de l'avion, réalisations de check-list).

2.1 METHODE

Cette partie est à la fois le résultat d'un travail d'analyse d'une littérature scientifique et technique existante et d'un travail d'observation et d'entretiens contextuels réalisé avec des pilotes de ligne en activité. Pour réaliser cette analyse de l'activité en situation écologique, nous avons recueillis des données lors de séances d'observation menées en contexte simulateur ou lors de vols réels et d'entretiens semi-dirigés (annexe 10.2). Les enregistrements vidéo des séances nous ont permis dans un deuxième temps de retranscrire l'intégralité des échanges et d'extraire 260 citations que nous avons classés et tagués (par thèmes et sous-thèmes principaux) dans une application web d'analyse de données quantitatives développée par nos soins (voir annexe 10.5). Les thèmes identifiés sont soit issus de l'activité (automatisme, collaboration, conscience de la situation) soit en rapport avec le corps et les interactions tangibles (gestes, formes, spatial) ou soit ont émergé des différentes séances (rythme, niveaux de contrôle). A partir de ce travail de classification, nous avons, dans un troisième temps, extrait de la base de données des caractéristiques clés de l'activité de pilotage que nous avons confrontées aux contraintes liées à l'apparition de nouveaux dispositifs tactiles dans les cockpits.

2.2 L'ACTIVITE DE PILOTAGE D'UN AVION DE LIGNE

L'activité de pilotage se décompose en quatre tâches hiérarchisées : piloter (contrôler l'attitude de l'avion), naviguer (suivre une trajectoire), communiquer (maintenir la communication avec le sol) et gérer les systèmes (superviser le fonctionnement des systèmes de bord) (Schutte and Trujillo, 1996). Ces différentes activités sont réparties entre les pilotes suivant des procédures précises qui permettent de garantir une bonne gestion des ressources de l'équipage (*Crew Resource Management* - CRM). Cette organisation du travail s'inscrit dans un double environnement, l'environnement extérieur du mobile en déplacement, toujours changeant et instable et l'environnement intérieur du cockpit statique, organisé (Figure 3) et structurant pour l'action/perception des pilotes. Afin de mieux appréhender les enjeux de l'apparition des surface tactiles dans les

cockpits de l'aviation commerciale nous allons présenter dans la suite de cette section l'activité prescrite de pilotage.



Figure 3. Les différents panneaux d'instruments dans le poste de pilotage de l'airbus A350 :
1/ Side-Stick, 2/ Main Instrument Panel, 3/ Glareshield, 4/ Overhead Panel, 5/ Pedestal

2.2.1 Les différentes tâches de l'activité de pilotage

L'objectif principal d'un équipage de l'aviation commerciale est de transporter des passagers ou du fret d'un aéroport à un autre de manière sûre et efficace. Pour réaliser cette mission les pilotes s'investissent dans 4 tâches fondamentales généralement identifiées pendant un vol et classées par ordre de priorité de réalisation dans un contexte dégradé ANCS (*Aviate, Navigate, Comunique, Systems Management*) :

Piloter (*Aviate*) : cette tâche regroupe toutes les actions sur les différentes commandes de vol pour conserver une portance nécessaire à la stabilité du vol. Elle incombe au PF (Pilote en fonction), qui la réalise en manipulant par exemple le palonnier pour la gestion du lacet ou la poignée de gaz pour la gestion de la poussée (Figure 4).



Figure 4. Instruments utilisés pour la tâche de pilotage sur l'Airbus A350 : 1/ Sidestick, 2/ Primary Flight Display, 3/ Rudder Pedals, 4/ Speed Brake Lever, 5/ Flaps Lever, 6/ Thrust Levers, 7/ Landing Gear Lever

Naviguer (*Navigate*) : consiste à connaître à tout moment la position de l'avion dans l'espace, gérer le plan de vol, assurer le passage par des points remarquables, éviter des obstacles potentiels (zones interdites de l'espace aérien, orages...).



Figure 5. Instruments utilisés pour la tâche de navigation sur l'Airbus A350 : 1/ Navigation Display, 2/ Electronic Flight Instrument System Control Panel 3/ Multi-Function Display

Communiquer (*Communicate*) : assurer l'échange d'information avec le sol (contrôle aérien ; exploitation), entre les membres d'équipages et avec les passagers.



Figure 6. Instruments utilisés pour la tâche de communication sur l'Airbus A350 : 1/ Radio Management Panel, 2/ Multi-Function Display

Gestion des systèmes (*System Management*) : assurer le contrôle de l'état des systèmes de l'avion (statuts des systèmes électriques et hydrauliques, états des commandes de vols, informations sur le kérosène...)



Figure 7. Instruments utilisés pour la tâche de gestion des systèmes sur l'Airbus A350 :
1/ Overhead panel, 2/ Multi-Function Display 3/ Keyboard and Cursor Control Units

La tâche de Séparation (*Separate*) est parfois ajoutée dans la littérature scientifique récente (Hooey et al., 2011) pour tenir compte des nouvelles responsabilités qui incomberont aux pilotes dans l'environnement Next Generation Air Transportation System (NetGEN USA) ou SES (*Single European Sky*). L'objectif de ces programmes est de mettre en place l'échange en continu d'informations liées à la position des avions en vol et des points de cheminement. Avec cet outil, à l'horizon 2025 - 2030, pilotes et contrôleurs aériens pourront affiner les trajectoires de vol. Outre un gain de temps pour les voyageurs, l'optimisation des routes aériennes devrait permettre une économie de carburants et une réduction des émissions de gaz à effet de serre de l'aviation civile.

Concernant les avions de ligne, s'ajoute aux activités avion précédemment citées une activité spécifique de gestion de la mission commerciale pour la compagnie aérienne et conformément à ses engagements commerciaux (service, ponctualité, etc...). Un vol est le plus souvent opéré par l'équipage dans le cadre d'une rotation ou succession de plusieurs liaisons aéroportuaires consécutives, résultant en une charge de travail supplémentaire (anticipation des prochains vols, stress lié aux retards accumulés, contraintes réglementaires, ...) et une fatigue des pilotes qui peuvent limiter leur performance.

La distribution de ces différentes tâches dépend des procédures standards, de la hiérarchie au sein d'un cockpit (*Captain* (CPT) ou *First Officer* (F/O)) et de la fonction attribuée à chacun par accord explicite (*Pilot Flying* (PF) ou *Pilot Monitoring* (PM)). Dans le cadre du statut hiérarchique et de son rôle fonctionnel, chacun des deux pilotes est responsable de plusieurs activités et doit souvent exécuter deux ou plusieurs tâches simultanément afin de répondre aux exigences opérationnelles. Pour ce faire, les pilotes interagissent avec les systèmes de l'avion au moyen de multiples affichages numériques, utilisant de nombreux contrôleurs physiques et effectuant une multitude d'opérations (Loukopoulos et al., 2001). Ils monitorent sans interruption les différents afficheurs et doivent,

dans certaines phases de vol, faire des transitions visuelles constantes entre l'intérieur (tableau de bord) et l'extérieur de l'avion pour contrôler l'environnement et s'assurer de la correspondance des données entre les informations restituées par les instruments et le monde réel (Mackenzie, 2014). Les pilotes de ligne sont donc constamment engagés dans des activités multiples et parallèles qui impliquent une bonne gestion des ressources cognitives ainsi que la mobilité et la disponibilité du regard.

2.2.2 Les procédures standards : *flows* et checklists

Pour assurer une bonne gestion des ressources de l'équipage (CRM) prévenir les erreurs et maintenir un haut niveau de performance, les pilotes sont formés pour dérouler des procédures standards (SOPs ou Standard Operating Procedures). Ces procédures ont été élaborées durant des décennies par des retours d'expériences d'incidents et d'accidents (Helmreich et al., 1999). Elles sont un support à la communication interpersonnelle, le leadership et la prise de décision dans le poste de pilotage. Les objectifs principaux des SOPs sont d'identifier et de décrire les tâches à réaliser par l'équipage en fonction des phases de vol, d'organiser la collaboration et de valider et vérifier les actions de façon méthodique pour continuer le vol en toute sécurité (Degani and Wiener, 1997). Ces procédures sont définies par les constructeurs en fonction du modèle d'avion et peuvent être ensuite adaptées par les compagnies aériennes pour répondre à des impératifs d'exploitation particuliers. Dans le cadre de ce travail nous nous sommes intéressés à deux types de procédures qui s'inscrivent particulièrement dans l'espace physique du cockpit et qui mettent en jeu les sens proprio-kines-thésique des pilotes : les *flows* (circuits visuels) et les listes de vérification aussi appelées check-list (de l'anglais checklist).

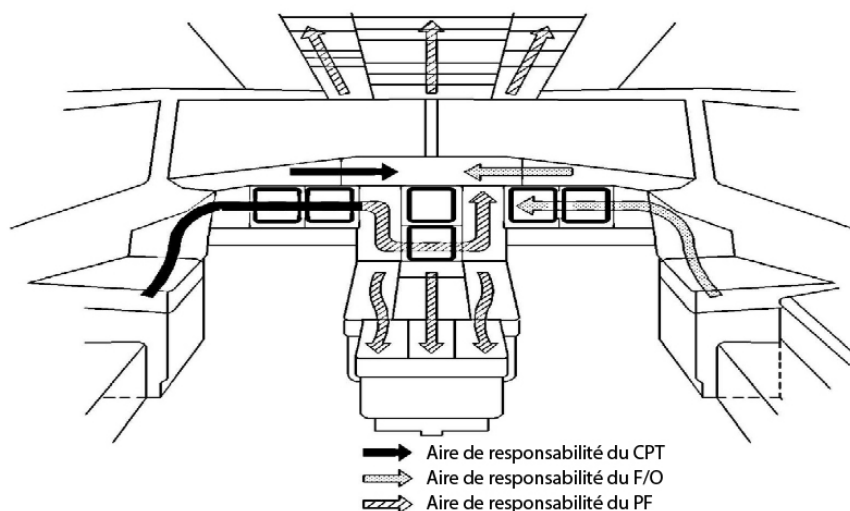


Figure 8. Les zones de responsabilités et le sens de réalisation du flow en fonction du rôle et du grade

Les *flows* (circuits visuels)

Un *flow* (appelé aussi scanning visuel) est une méthodologie de base pour modifier et vérifier la configuration de l'avion à différentes phases de vol. Ces *flows*

peuvent être soit liés à des procédures particulières soit réalisés librement au cours du vol pour monitorer les systèmes en respectant les zones de responsabilités en fonction du rôle (PF ou PM) et de leur grade (CPT et F/O) (Figure 8). Le but de ces *flows* est de pouvoir effectuer toutes les configurations et vérifications de l'état de l'aéronef. A partir de la documentation de description des *flows* spécifiques (en fonction de la phase de vol) fournie par le constructeur (Figure 9) les pilotes doivent répéter les séquences en situation sur simulateur pour que l'enchaînement des actions soit parfaitement mémorisé et puisse être déroulé sans hésitation. La disposition spatiale des instruments va conditionner la forme du flow et donc permettre le développement d'une **mémoire musculaire et spatiale** du circuit de vérification (Roth et al., 2015) (Matton et al., 2018).



Figure 9. After Start Flow sur A320. Procédure à réaliser après le démarrage des moteurs et avant le roulage. A gauche en jaune le flow du Pilot Monitoring et à droite en vert le flow du Pilot Flying

Check-list (liste de vérification)

La principale fonction de la check-list est de permettre à l'équipage de vérifier que l'avion est correctement configuré pour aborder un nouveau segment de vol (Before start, After start, Before Takeoff...) (Degani and Wiener, 1993). Il existe 3 types de checklist en fonction des situations rencontrées par les pilotes : situation normale, situation anormale et urgences. Elles sont accessibles généralement sous forme papier au dos du *Quick Reference Handbook* (QRH), sous forme imprimée et positionnée directement sur le *yoke* (Boeing 737/747) ou sous forme numérique sur le Multi-Function Display (MFD), pour les avions plus récents comme l'Airbus A350 ou le Boeing 777 (Figure 10). Présentées Sous forme de liste de paramètres à vérifier elles sont généralement initiées à la demande du PF ; les différents points de la liste sont énoncés à haute voix par le PM ; le PF (ou les deux pilotes lorsque la vérification concerne leurs instruments respectifs) répond à chaque point à voix haute. Elles fournissent un cadre normalisé et séquentiel qui permet de mener une supervision mutuelle du système en garantissant une coordination optimale de l'équipage. Des erreurs dans le suivi de cette procédure ont été à l'origine de nombreux incidents et accidents (Dismukes and Berman, 2010).

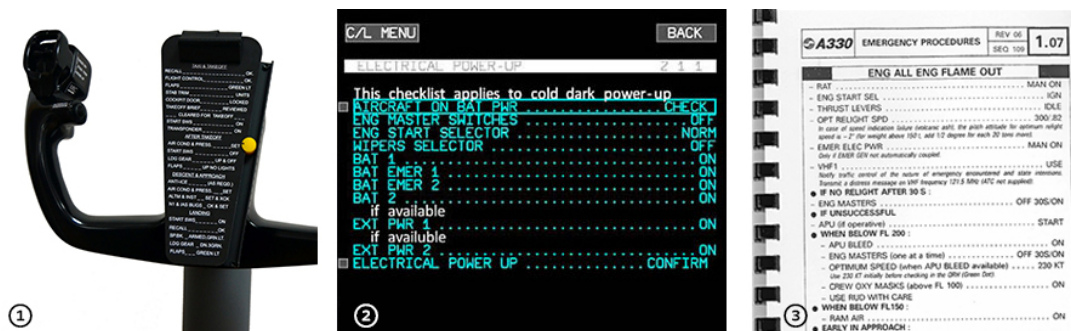


Figure 10. Exemples de check-list : 1/ sur le yoke du Boeing 737, 2/ sur écran et 3/ au dos du QRH

La réalisation des différentes tâches des SOP exigent du temps, de l'attention et des ressources cognitives, et contribuent donc à la charge de travail (Degani and Wiener, 1997). La planification de ces tâches, suivant les règles établies par les concepteurs des SOP, mais aussi de par la répartition effectuée par l'équipage en fonction des priorités et du contexte a pour objectif d'optimiser le séquençement afin d'éviter des périodes de très forte ou très faible charge de travail. Le « rendement de l'équipage » (Wiener, 1993) dans les cockpits automatisés à 2 pilotes dépend donc de la bonne gestion de l'enchaînement des actions et du maintien d'une charge de travail optimal.

2.2.3 Dimensions temporelles

L'activité de pilotage se déroule dans un environnement dynamique en constante évolution liée aux actions des pilotes ou aux évolutions des conditions de vol (Pastorelli, 2007). Le déplacement en l'air de l'avion à une vitesse élevée conjugué avec des obligations de modification de configuration en fonction de l'altitude, de la position et de la vitesse soumet les opérateurs à une pression temporelle importante. Les différentes actions doivent être coordonnées et séquencées pour garantir un déroulement optimal du vol. Pour chaque tâche dans le poste de pilotage, il y a une "fenêtre d'opportunité" définie par deux limites physiques (Degani and Wiener, 1997). C'est le cas, par exemple, de la fenêtre d'opportunité pour effectuer la check-list « DESCENT » qui débute au commencement de la descente et se termine au passage des dix mille pieds ; ces deux limites définissent une période de temps qui varie en fonction du taux de descente, de la direction et de la vitesse du vent. Même si les pilotes peuvent choisir de réaliser les tâches quand ils le souhaitent dans la fenêtre d'opportunité, il paraît important pour le maintien d'une charge de travail optimale de favoriser une réalisation en début de fenêtre d'opportunité (Raby and Wickens, 1994)

2.2.4 Environnement physique dynamique

L'environnement physique de déroulement du vol est complexe et changeant. Entre les mouvements des masses d'airs en fonction des altitudes, les évolutions des conditions météorologiques aux points de décollage et d'atterrissage et les conditions et densités du trafic aérien, l'équipage doit consacrer des ressources cognitives pour récupérer les informations relatives à ses évolutions et

tendances afin d'anticiper les prises de décision nécessaires. Ainsi, pour garantir la sécurité du vol (Latorella et al., 2001), les pilotes doivent constamment appréhender les conditions météorologiques en les confrontant aux caractéristiques de performance de l'aéronef, à leurs propres compétences et capacités, aux contraintes de l'espace aérien et du trafic en cours etc. Ce processus décisionnel coûteux cognitivement est d'autant plus important que selon le *National Transportation Safety Board* (États-Unis) et les bases de données de la FAA, les conditions météorologiques et plus particulièrement la turbulence sont la cause de 70 % des accidents et incidents concernant des aéronefs commerciaux entre 1991 et 2001 (Sharman, 2016). Pour répondre à ces exigences, les concepteurs des systèmes avioniques cherchent à améliorer le partage et la représentation des données météorologiques (Stähli et al., 2018) et des informations de trafic tout en préservant des modalités d'interaction utilisables en toute situation (vibrations, turbulences...)

2.2.5 Mouvements oculaires et attention visuelle

Le champ de vision de l'équipage est occupé par une mosaïque dense d'instruments et d'écrans qui affichent en permanence des données évolutives sur l'état de l'aéronef. Les pilotes effectuent des mouvements oculaires de déplacements (saccades) pour chercher l'information et de fixations, de 40 ms à plus de 800 ms (Rayner, 1998), pour extraire et traiter l'information visuelle de la zone fixée. La durée des fixations dépend en partie du traitement cognitif du contenu à extraire ; elle peut varier considérablement entre, par exemple, de la perception de relations entre éléments graphiques (ligne d'horizon sur le PFD) ou de la lecture d'informations textuelles (niveau de vol) (Reingold et al., 2012).



Figure 11. Représentation schématique d'une série de fixations et *dwells* séparés par des saccades

Sur un même instrument les pilotes peuvent parfois effectuer des fixations multiples avec des micro-saccades, ce groupe de fixation à l'intérieur d'un affichage est appelé « *dwell sequence* » (Glaholt and Reingold, 2009). De nombreuses recherches sur les mouvements oculaires dans le cockpit (Mackenzie, 2014) ont montré, par exemple, que le temps d'observation sur une zone (*Proportional Dwell Time*) varie selon la phase de vol (Brown et al., 2002), que la fréquence de

fixation dépend du degré d'expertise des pilotes et que la matrice des transitions oculaires varie selon la charge de travail (Kasarskis et al., 2001). La disposition des instruments, le type de contenu à extraire et les séquences de scanning procédurales ont donc un impact important sur la charge mentale et la conscience de la situation. Les systèmes avioniques actuels sont conçus pour favoriser et optimiser les mouvements oculaires et donc la bonne distribution de l'attention des pilotes.

2.3 LE STATUT DU CORPS ET DE L'ESPACE DANS L'ACTIVITE DE PILOTAGE

Dans cette partie, nous exposerons les résultats du travail d'analyse des données qualitatives recueillies lors des séances d'observations et d'entretiens avec des pilotes de ligne. Nous avons regroupé les différents témoignages dans quatre catégories principales : *Le statut du corps dans l'activité, Utilisation de l'espace physique, La parole pour externaliser, Structure temporelle et rythmique*. Cette approche nous a permis de comprendre l'activité de pilotage en plaçant le pilote et ses sensations au cœur de notre analyse. Les résultats sont utilisés pour préciser les questions de recherche présentées dans la section 2.5.

2.3.1 Le statut du corps dans le processus de perception/action dans le cockpit

La perception instrumentalisée indirecte

Les pilotes de ligne soulignent l'importance de se fier à la perception indirecte par les instruments. Contrairement aux vols en VFR (*Visual Flight Rules*), ou « vol à vue », pour les vols en IFR (*Instrument flight Rules*) les pilotes sont obligés de se fier uniquement aux informations délivrées par les instruments de l'avion pour opérer des vols en situation de visibilité limitée (vol de nuit, passage dans des nuages). Sans repère extérieur (phénomène de perte d'horizon) les sensibilités vestibulaire, somato-sensorielle et visuelle peuvent être à l'origine de désorientations spatiales (Gibb et al., 2011), et comme l'a expliqué un pilote : « *il faut croire en ton horizon artificiel. Il ne faut pas croire à tes sensations, tu peux avoir une illusion, crois à ton instrument* ». Les pilotes sont plus confiants dans l'exactitude des informations numériques abstraites fournies sur leurs écrans, telles qu'une valeur numérique d'altitude ou de vitesse, que dans une représentation visuelle synthétique de la situation de l'avion. Comme l'a expliqué un pilote, il faut se poser la question de « *la représentation synthétique des éléments, jusqu'à quel point ils sont réels ou pas* ». Le seul sens auquel les pilotes semblent faire confiance est le sens tactile, qui leur permet de différencier les commandes ou les boutons par leur forme (Figure 12), comme l'ont indiqué plusieurs pilotes : « *vous savez que le bouton avec des crans plus grands est la vitesse* » ; « *franchement les gros boutons qu'on connaît par cœur, on les sent au toucher* ».



Figure 12. Utilisation des propriétés de la forme des contrôleurs physiques :
a) volets ; b) APU ; c) frein de parking.

Le corps décrit comme un instrument

Les pilotes peuvent décrire leur corps d'une manière technique, par exemple en expliquant qu'il n'est pas équipé de capteurs, comme dans cette description de l'atterrissage : « *On n'a pas de capteurs qui vont nous donner des sensations de l'avion, **nos propres capteurs c'est nous** donc comment est-ce qu'on va le sentir cet avion ... est-ce que j'ai toujours dans mes mains la technicité pour poser un avion vent de travers.* ». Dans un autre exemple, un pilote utilise la métaphore d'un capteur qui informerait l'autre pilote de sa nervosité lors de la manipulation du manche : « *Comme on n'a pas d'instrument d'activité "manche de l'autre", on est obligé de regarder* ». Ou encore cette description de l'effort musculaire comme capteur de la bonne position du manche « *en fait, on sent le manche, il durcit, et donc on diminue l'effort au manche (...) **c'est musculaire*** ». Enfin, la description du geste répété et parfaitement reproductible comme une mécanisation du corps « *donc on s'entraîne pour avoir une mécanisation de la gestuelle. L'objectif, là, c'est de **mécaniser le geste*** ».

La perception par les gestes

Le **geste pour percevoir** est souvent explicité, comme par exemple pour ce pilote qui décrit l'action de consulter des paramètres par des mouvements du corps et de la tête « *on sait ce qu'on cherche, on va aller **capturer l'information** dont on a besoin, on la met dans sa tête, on revient à ses instruments* » ; la capture de cette information est illustrée par des gestes répétés et rythmés de saisie avec la main.



Figure 13. Gestes pour percevoir : a) contrôle de l'over Head ; b) contrôle des speed brake.

Cet autre pilote utilise le geste en plus du regard pour vérifier la configuration d'un panneau de contrôle : « *oui, musculaire, avec les yeux, ça ne suffira pas ;*

parce qu'en fait on touche quand on passe sur les manettes on vérifie (...) que tous les boutons poussoirs sont bien en place » (Figure 13). Cette situation illustre l'utilisation de la perception tactilo-kinesthésique pour confirmer la perception visuelle globale d'une scène.

Les sensations du corps et des mouvements pour améliorer le contrôle

Contrairement à la perception abstraite potentiellement illusoire, des sensations concrètes sont mises en avant dans des actions nécessitant un contrôle intense, où les pilotes ont besoin de sentir leurs mouvements et leur corps. Dans de telles situations, comme l'a explicité un pilote, ils doivent « *ne faire qu'un avec l'avion* », pour le « *sentir* » et pouvoir « **faire corps avec l'avion** ». Un autre pilote a décrit une telle situation : « *Ce qui se passait à l'extérieur était représenté par l'action sur le minimanche [geste sur un minimanche imaginaire] ... avec une corrélation avec ce qu'on voit [pointe la vue extérieure] ce qu'on sent [main droite doigt tendu sur la jambe] et ce **sur quoi on agit** [main droite désigne main gauche]* ». Ces mises en évidence de la sensation apparaissent aussi dans les descriptions de situations où le pilote subit la situation et suit l'avion. Comme par exemple dans la description de la phase finale d'un atterrissage avec peu de moyens de contrôle : « *la situation que l'on subit le plus, c'est je dirais la dernière seconde avant l'impact... avant de toucher (...) il n'y a pas de contrôle possible ... **on sent que ça va bien se passer ou pas*** ». Le caractère incarné de cette situation est souligné par l'absence d'un capteur objectif : « *il n'y a pas d'instrument qui puisse nous donner une information à ce moment-là, c'est le vécu, la vitesse de montée de la piste par exemple [frappe ses mains dos sur paume]* ».

Le contrôle par les mouvements oculaires

Les fixations et les mouvements du regard jouent un rôle dans les situations de contrôle où le corps est impliqué : « *lorsqu'on voulait intercepter une trajectoire ... il suffisait de la regarder (...) [se penche un peu vers la droite] et d'évoluer comme ça [bras droit s'inclinant vers la droite] (...) on avait vraiment une sensation de contrôle réel uniquement au regard* ». Cette utilisation du regard pour se diriger est aussi explicitée par un autre pilote à propos du minimanche de l'Airbus A320 : « *cet avion, tu le mets là où tes yeux t'amènent... c'est à dire que là où vous posez les yeux quelque part, ben il suffit d'agir, et l'avion va aller là où tu as posé tes yeux* ». La direction du regard qui dirige notre déplacement est un fait bien connu de notre rapport sensorimoteur au réel (la vision et la locomotion sont liées sur le plan fonctionnel (Crawford, 2016)).

2.3.2 L'utilisation de l'espace physique du cockpit

Grâce à la formation et à une répétition constante des tâches en situation, les pilotes connaissent avec précision la configuration et les dimensions du poste de pilotage ainsi que la position de chaque panneau ; ils sont capables de localiser automatiquement les commandes sans utiliser leurs yeux : « *Ce sont des **gestes** qui sont faits tellement souvent, l'amplitude, la position elles [les mains] **tom-bent automatiquement au bon endroit*** ». C'est d'autant plus vrai lorsque les

commandes sont regroupées logiquement en sous-systèmes, ou lorsque leur distance est cohérente avec la position du corps du pilote : « *pour le radar météo, on sait quand on pilote et que l'on regarde dehors, la main va tomber sur le radar météo et on va pouvoir régler l'inclinaison de l'antenne sans regarder* » ou encore « *la manette de volets par exemple on voit [en faisant un geste sans le regard] où est-ce qu'elle est* ». C'est aussi le cas pour des systèmes qui sont accessibles par un cheminement en utilisant l'espace comme guide : « *vous remon- tez le long de l'overhead panel jusqu'à arriver en butée sur l'interrupteur qui est là et ensuite vous déplacez légèrement sur la droite et vous appuyez sur ce bouton gardé par un détrompeur [actions sans les yeux]* ». La formation inclut à cet égard des séquences visant à manipuler à l'aveugle les commandes avion de l'overhead panel pour par exemple en situation de fumée dans le cockpit pouvoir atteindre les commandes d'allumage et d'extinction des moteurs. Cette faculté de mémoire des mouvements dans l'espace dépend de la sensibilité propriocep- tive et kinesthésique du corps. Ce corps qui pour Merleau-Ponty est bel et bien « le pivot du monde » (Merleau-Ponty, 1945).



Figure 14. Flow (circuit visuel) effectué lors d'une séance d'observation sur simulateur

En plus de permettre l'action sans les yeux, la distribution spatiale des instru- ments est utilisée pour apprendre et reproduire les procédures de scanning et de flows. Le pilote décrit son scanning comme un « cheminement géogra- phique » : « *je vais faire mes panneaux et je vais partir de là (extrême gauche du cockpit) comme ça et je vais passer la pour vérifier ça, pour vérifier ça, pour vé- rifier ça et ensuite je vais descendre comme ça (montre la console centrale) et comme ça* » (Figure 14). En plus de la disposition, la forme et l'orientation des actuateurs de type interrupteur ou manette permet de faciliter la perception de l'état de configuration : « *un **petit coup d'œil** sur la **position des volets** [posi- tion de la manette de réglage des volets] m'indique comme quoi ils sont en transit ou ils sont sortis* ». Cette importance de la forme physique visible dans l'envi- ronnement a été soulignée par un autre pilote en comparant une représentation 2D à un bouton physique : « *là [en montrant un bouton sur un écran] visuelle- ment il n'y a pas de relief. Là j'étais incapable de vous dire si c'était en on ou en off* ». Enfin, la forme physique des actuateurs est présentée par certains pilotes comme un support à l'action de réglage, ou un moyen de se reposer et de prépa- rer une configuration : « *La main reste sur le bouton rotatif alors que le regard*

vérifie la vue » ou encore « *quand on a besoin on tient le bouton ou c'est le bouton qui tient la main* ».

2.3.3 La parole pour externaliser

La communication orale dans l'activité de pilotage d'avion de ligne est primordiale et a déjà été largement étudiée [(Hutchins, 1995), (Hutchins and Palen, 1997) (Neville, 2004)]. Nous ne nous intéressons ici qu'aux propriétés de la communication orale entre pilotes qui nous paraissent pertinentes dans le cadre de la conception d'interface tangible pour le cockpit.

Au cours des entretiens, les pilotes ont très souvent utilisé des verbes exprimant la parole : ils explicitent qu'ils « *disent* », « *racontent* », « *rapportent* » quelque chose. Par exemple, au lieu de simplement décrire les actions lors du réglage d'un paramètre (comme la vitesse), ils mentionnent : « *c'est le PF qui va dire ce qu'il va faire et l'autre qui va contrôler (...) Et donc il demande à son PM l'altitude suivante : "tu m'affiches 3000 pieds, tu m'affiches 2000 pieds (...) L'autre le fait* ». Cela met en évidence la nécessité pour les pilotes d'apporter leurs représentations dans un espace partagé et perceptible, en extériorisant leurs pensées d'une manière assez similaire à celle des contrôleurs aériens qui utilisent des bandes de papier pour collaborer (Mackay, 1999). La parole peut avoir un rôle d'affichage temporaire permettant de faciliter les processus cognitifs. Ce rôle d'affichage est explicité par l'utilisation de formes narratives, comme par exemple la description d'un *briefing* d'arrivée comme une histoire qui est racontée : « *Avant la descente, pendant le briefing d'arrivée, pendant lequel on raconte comment on voit les choses, comment on a compris les choses et ce qu'on va faire* ». Ou encore la description du briefing comme un moyen de se « *réunir autour du projet d'action* » comme on consulterait ensemble une information affichée.

2.3.4 Les structures temporelles et rythmiques incarnées

Les rythmes comme ressource incarnée

D'après (Simondon, 2013) et (Fraisie, 1957) le temps est un mode de relation entre l'organisme et son milieu. Afin d'éviter le « *trop tôt* » ou le « *trop tard* » une adaptation constante de l'évolution de l'organisme à celle du milieu est nécessaire. Cette recherche de synchronisation de l'horloge physiologique des pilotes à la pluralité des événements d'un vol (phases, vitesses, altitudes, distances) permettant de « *maintenir un engagement sensorimoteur continu et coordonné avec [leur] environnement* » (Clark, 2011) est omniprésente dans les récits recueillis lors des observations et entretiens.

Un aspect temporel important que nous avons pu constater est que l'activité de pilotage est structurée par des rythmes⁷. Cette structure n'est pas seulement présente dans des schémas temporels répétés au cours du temps (procédures),

⁷ Le rythme est la caractéristique d'un phénomène périodique induite par la perception d'une structure dans sa répétition (Wikipédia, 2018)

comme cela peut être le cas dans des activités de collaboration dépendantes du temps (Reddy and Dourish, 2002), mais aussi dans le séquençement de geste et de paroles des pilotes (Figure 15).

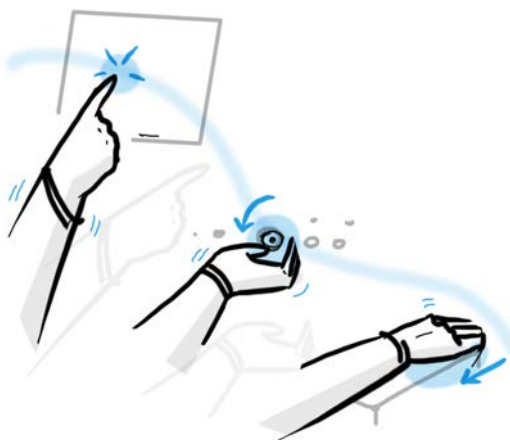


Figure 15. Illustration de l'enchaînement rythmé de gestes. Réalisation Claire Lavenir

Une incarnation du rapport au temps qui transparait notamment dans les tâches de balayage visuel pour vérifier les instruments à travers un chemin et un tempo prédéterminé. La répétition de « *nous touchons* » dans la citation suivante, soulignée par des gestes de contact corporel rythmés, est une explicitation de ces rythmes incarnés : « *en fait on touche quand on passe sur les manettes (...) et pareil ça va être là-haut [en montrant l'overhead panel] on va toucher, on va faire comme ça ; on va toucher le panneau (...), comme ça on touche, vous voyez on a une espèce de musique comme ça qui fait que l'on ne pourrait pas juste faire avec les yeux* ». En même temps qu'il a exprimé le rythme de cette séquence par le flux d'information temporalisé, le pilote a souligné la nature incarnée de la tâche, expliquant que le balayage n'est pas seulement visuel, mais aussi tactile. L'action tactile étant une activité plus « *musculaire* » que la seule utilisation des yeux. La séquence est également comparée à la musique, c'est-à-dire quelque chose que l'on apprend par cœur et dont on apprécie la répétition, en assurant une certaine automatisa-tion physique pour obtenir un contrôle sûr et exhaustif. Nous avons en effet remarqué plusieurs associations de rythmes et de tâches de surveillance, illustrant que les rythmes, en tant que routines incarnées, sont une ressource pour soutenir le travail des pilotes. Soulignant sa structure rythmique, un pilote a également comparé le briefing à une « *chronologie* », c'est-à-dire une structure temporelle où les éléments sont disposés dans l'ordre du temps et à un rythme donné : « *la chronologie on l'a fait au fur et à mesure qu'on passe les cartes (...) c'est très très chronologique le briefing* ». Une autre structure rythmique est également observable dans l'utilisation de la parole pour la collaboration. Par exemple, la répétition en séquence du terme « *on parle* » dans cette description utilisant une métaphore spatiale comparant la phase d'approche à un fil physique sur lequel il structure l'organisation temporelle de la collaboration : « *c'est comme si on déroulait un fil de là où on est vers là où on va (...) donc*

on parle de la descente, on parle de l'approche, on parle de la finale, on parle de la remise de gaz, et puis si on loupe la remise de gaz ».

2.3.5 Synthèse des éléments de l'étude quantitative

- *Les pilotes doivent favoriser la perception indirecte (médiatisée par l'instrument) pour appréhender le déplacement de l'aéronef dans l'espace. Cette perception médiatisée prescrite pour les vols IFR permet de piloter sans visibilité extérieure (vol de nuit, nuage, etc.) en minimisant le risque de désorientation spatiale. La perception directe est à privilégier dans l'espace interne du cockpit.*
- *Le corps du pilote peut être un instrument (un capteur) dans des situations où il n'y a pas d'autres moyens de connaître le comportement de l'avion (capteurs objectifs). Le couplage corps-avion est souhaité pour un réglage fin alors que la mise à distance par l'instrument est privilégiée pour éviter la désorientation.*
- *Le pilote utilise la perception tactilo-kinesthésique pour confirmer la perception visuelle globale d'une scène. Le sens du touché couplé à la proprioception est efficace pour discriminer les formes et les positions des instruments*
- *Le regard est utilisé comme action de guidage, pour viser une cible et diriger le corps et la machine.*
- *Le « corps pivot du monde » dans le cockpit. La perception tactilo-kinesthésique et la proprioception permettent la localisation, la vérification et l'activation des instruments en limitant l'utilisation du canal visuel.*
- *L'espace du cockpit et les instruments physiques le composant sont un support indispensable à l'externalisation réduisant ainsi la charge cognitive.*
- *La forme et la disposition des actuateurs physiques facilite la perception de l'état du système et améliore la préhension et la stabilité de l'action.*
- *La parole produit une extension qui s'incarne dans l'espace physique du cockpit.*
- *Le pilote adapte son rythme physiologique au rythme de l'avion, c'est une synchronisation qui passe par le corps et la parole.*

2.4 LES EVOLUTIONS DES COCKPITS DE L'AVIATION COMMERCIALE : DE L'INSTRUMENT ANALOGIQUE A LA SURFACE TACTILE

De la Sud-Aviation SE 210 Caravelle [1958-1973] (Figure 16.a) au Boeing 777X [mise en service programmée en 2020] (Figure 16.b) l'évolution des cockpits de l'aviation commerciale se traduit par une agrégation des systèmes, une fusion et une synthétisation des données et des affichages, une réduction de l'équipage et une dématérialisation progressive des interfaces pilotes-systèmes (Avsar et al., 2016b), (Lim et al., 2018). Les cadrans, jauges et manettes physiques laissent la place progressivement à de grandes surfaces d'affichage qui deviennent tactiles dans les dernières versions d'interfaces pilote-système. Ces nouveaux systèmes avioniques sont l'objet de programmes aéronautiques (avions ou hélicoptères) en cours de fabrication, certification ou d'étude, voire sont déjà opérationnelles (ex. *Pro Line fusion* de Rockwell Collins). Dans cette section nous commencerons dans un premier temps par une présentation de l'évolution des interfaces pilotes-Systèmes au travers des différentes générations de cockpits (*Classic Cockpit*, *Glass Cockpit* première et deuxième génération et *Interactive*

cockpit). Puis dans un deuxième temps, nous étudierons plus précisément la dernière génération de cockpit tactile en précisant les défis à venir pour l'industrie aéronautique.



Figure 16. De l'instrument analogique à la surface tactile
a/ Cockpit de la SE 210 Caravelle ; b/ Cockpit tactile du Boeing 777X

2.4.1 Une dématérialisation progressive des interfaces Homme-Système

De nombreuses études font état de l'évolution des cockpits en présentant une segmentation différente des grandes époques, comme par exemple celles de (Lim et al., 2018) et (Moir et al., 2013). Dans le cadre de notre travail de recherche nous avons privilégié la classification de (Abbott, 2001) qui nous permet de décrire l'évolution des interfaces Pilotes-Systèmes en nous focalisant sur la façon dont les pilotes visualisent l'information et interagissent avec les systèmes de l'avion.

Classic Cockpit

Les cockpits dit classiques ou conventionnels que l'on retrouve par exemple dans le Concorde (Figure 17), le B-727 ou le DC-10 se caractérisent par un très grand nombre d'actuateurs mécaniques et d'afficheurs analogiques couplés à un système de pilote automatique relativement simple. Les données brutes des capteurs sont peu agrégées et traitées ; elles sont affichées sur des instruments dédiés répartis sur l'intégralité de la planche de bord et sur des panneaux secondaires (Figure 17). Cette distribution spatiale de l'information oblige l'équipage à effectuer une surveillance et une mise en relation continue des paramètres pour maintenir une bonne conscience de la situation. Cet environnement complexe avec une forte densité informationnelle nécessitait un équipage nombreux (3 à 5 personnes) avec des expertises différentes (pilote, navigateur, mécanicien, opérateur radio). L'action sur les systèmes se fait au moyen d'actuateurs physiques de types manettes, boutons, leviers.



Figure 17. *Classic Cockpit – Concorde (1965 – 1979)*

Première génération de *Glass cockpit*

L'apparition des écrans cathodiques et l'amélioration des systèmes de vol automatique a permis de simplifier le poste de pilotage, de diminuer la charge cognitive des pilotes et de réduire l'équipage à deux personnes. La première génération de *Glass Cockpit*, comparée à un cockpit classique, présente un environnement visuel beaucoup moins complexe (Figure 18). Cette génération de cockpit a radicalement changé les interfaces des postes de pilotage des avions commerciaux, remplaçant des dizaines d'instruments mécaniques analogiques par un affichage numérique des informations du système de bord. Cette utilisation des écrans permet de regrouper, de synthétiser et de mettre en relation les informations, facilitant ainsi le travail de surveillance de l'équipage. L'intégration d'un premier système de gestion de vol (Flight Management System – FMS) couplé à l'affichage d'une carte et connecté au pilote automatique facilite le travail de pilotage et de navigation.



Figure 18. *Première génération de Glass Cockpit – Boeing 757*

Deuxième génération de *Glass cockpit*

Dans les années 1985, la deuxième génération de *Glass Cockpit* (comme par exemple l'A-320 (Figure 19) ou le B747-400) a encore permis de réduire le nombre d'instruments analogiques. Même si par rapport à la première génération la surface d'affichage numérique n'a pas considérablement augmenté, certaines jauges et cadrans ont disparu pour être intégrés au système d'affichage (Figure 19). Les données sont de plus en plus regroupées en unités fonctionnelles et affichées sur des écrans spécialisés, dédiés à chacune des principales activités de l'équipage, l'ensemble de ces écrans constituant le Cockpit Display System (CDS). L'amélioration du FMS et du pilote automatique a déplacé la charge de travail de l'équipage du pilotage vers la supervision des systèmes. L'automatisation a réduit le nombre de dispositifs d'entrée, cependant les interactions avec le système avion se font toujours par l'intermédiaire de contrôleurs physiques : interrupteurs, boutons poussoirs, minimanche... Ces contrôleurs physiques sollicitant les capacités tactilo-proprio-kinesthésique humaines ont prouvé leur efficacité pour l'interaction pilote-système, et notamment pour des contextes d'usage dégradés (ex. turbulences, fumée dans le cockpit ...).



Figure 19. Deuxième génération de *Glass Cockpit* – Airbus A320

Interactive cockpit

Dans le prolongement du *Glass Cockpit*, le concept de l'*Interactive Cockpit* (comme par exemple l'A350, A380, B777 ou B787) se différencie par l'intégration d'un clavier et d'un dispositif de pointage tel que le KCCU (Keyboard Cursor Control Unit). Cette nouvelle interface de type WIMP (Windows, Icons, Menus and Pointing device) permet aux pilotes de naviguer et d'interagir avec de nombreux widgets graphiques affichés sur les différents écrans du cockpit. Un standard industriel de spécification des interfaces graphiques (GUI) du cockpit (ARINC661: *Cockpit display system interfaces to user systems*, 2016) a été adopté afin de normaliser la définition de l'interface et le comportement système des éléments graphiques d'interaction. La norme ARINC 661 et les outils logiciels associés permettent de répondre aux exigences de spécifications, dans le cadre des processus de certification, et de produire un fichier binaire d'exécution à

partir de la définition de la structure (arbre) de widgets composant le CDS (*Cockpit display system*). Le nombre d'écrans a peu changé mais la surface d'affichage a encore augmenté par rapport à la génération précédente, les instruments analogiques, contrôleurs, afficheurs ou « backups », disparaissent peu à peu. La documentation papier a été en partie remplacée par un système numérique (*Electronic Flight Bag* - EFB), ou par un système spécifique, Onboard Information System (OIS) intégré au CDS (A350), facilitant grandement la consultation de cartes, listes de vérifications et procédures, ou l'utilisation d'applications spécialisées facilitant la gestion de l'avion.



Figure 20. Interactive Cockpit – Airbus A350

2.4.2 Le cockpit tactile : un nouveau défi pour l'aéronautique

Les nouveaux concepts de cockpit tendent à remplacer les dispositifs d'affichage ainsi que certains interacteurs associés du poste de pilotage par des écrans tactiles. Le défi pour l'industrie est de répondre à la complexité croissante des systèmes tout en privilégiant une flexibilité et une adaptativité des composants afin de proposer des lignes de produits génériques et d'optimiser les coûts de développement et de maintenance des systèmes avioniques. De nombreux industriels ont déjà développés des solutions tactiles pour le cockpit, certaines ont reçu une certification des autorités de l'aviation civile américaine (*Federal Aviation Administration* - FAA) et européenne (*European Aviation Safety Agency* - EASA) et ont déjà été déployées dans des environnements opérationnels. Nous allons dans un premier temps, nous intéresser un peu plus en détail à quelques exemples représentatifs de cette nouvelle génération d'interfaces tactiles puis, dans un deuxième temps, nous précisons les exigences qui ont guidé cette évolution et les avantages potentiels pour l'activité de pilotage.

Le développement du tactile pour les systèmes avioniques de l'aviation commerciale est apparu sous forme de concept permettant d'imaginer ce que serait le « cockpit du futur ». Cette approche menée par Thales Avionics dans le cadre du

projet européen ODICIS (One DIsplay for a Cockpit Interactive Solution) de 2009 à 2012 (Alapetite et al., 2012), (Zammit-Mangion et al., 2011), a permis de présenter un prototype de cockpit avec un écran continu. Cette nouvelle surface d’affichage par projection de grande taille permettait de repenser les modes de visualisation dans le cockpit avec une interface utilisateur reconfigurable dynamiquement. Inspiré de cette première version, le concept Thales Avionics 2020 (Hourlier, 2015), fondé sur des nouveaux principes de visualisation de type SVS (Synthetic Vision System) et sur des interfaces homme-machine orientées tâches, intègre un espace d’affichage composé de plusieurs écrans tactiles, permettant des continuités graphiques et interactives. Ces deux concepts offrent une surface d’affichage accrue, un mode de représentation synthétique et flexible améliorant d’après les concepteurs, la gestion des ressources cognitives de l’équipage pour optimiser le processus de prise de décision (Hourlier, 2015).

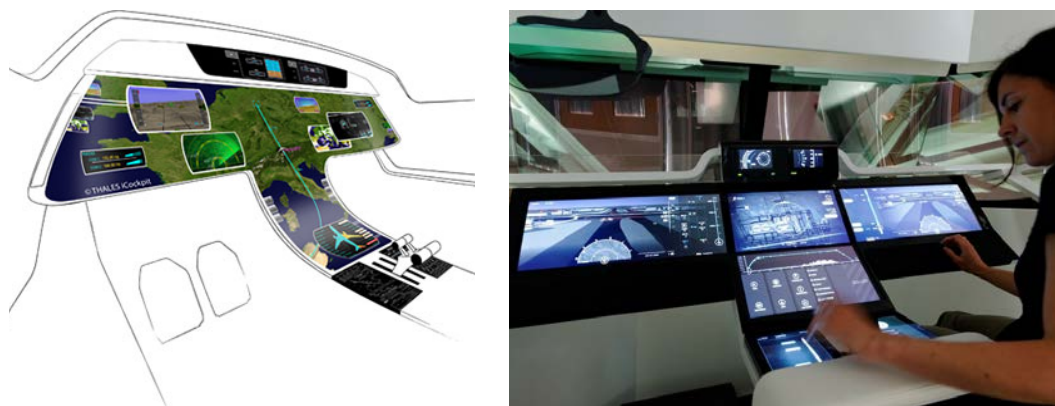


Figure 21. Vue artistique du cockpit ODICIS avec un écran tactile continue (à gauche)
Interface tactile du projet Avionics 2020 (à droite)

Plus proche d’une réalité opérationnelle, Rockwell Collins a modernisé sa gamme de produits « *Pro Line Fusion* » pour hélicoptères et avions d’affaires, en généralisant l’utilisation des écrans tactiles. Sur cette gamme, les interactions tactiles sont rendues possibles sur tous les écrans du poste de pilotage, y compris l’écran principal de vol (PFD). Les interactions tactiles de type monopoint permettent de modifier des paramètres de vols par l’utilisation de menus et formulaires, de configurer un plan de vol en manipulation directe sur une carte, de réaliser des actions de type glisser-déposer. Cette nouvelle suite avionique tactile est déjà opérationnelle dans la gamme Kingair 350 (Figure 22.a) de Beechcraft ou Citation CJ1 de Cessna après un processus de certification de type auprès de l’EASA et de la FAA. Il faut noter à ce propos que Rockwell Collins a rendu possible cette certification en maintenant les contrôleurs physiques traditionnels pour interagir avec les systèmes, les interactions tactiles constituant une alternative possible pour l’interaction à l’exclusion des commandes de vol. Toujours dans le secteur de l’aviation d’affaires, Honeywell, un autre fournisseur de systèmes avioniques, a développé une solution pour les modèles G500 et G600 du constructeur Gulfstream (Figure 22.b). Les interfaces tactiles limitées à quelques écrans non-critiques permettent d’afficher des options d’entrée en fonction de la phase de vol et des tâches à effectuer.

Enfin, concernant l'aviation commerciale, comme nous l'avons mentionné en début de chapitre, c'est le futur 777X (Figure 16.b) de Boeing qui sera le premier aéronef en 2020 à proposer une suite avionique tactile. Développée par Rockwell Collins, les interactions tactiles seront toujours de type monopoint mais pour favoriser la collaboration les deux pilotes pourront agir simultanément sur le même écran.



Figure 22. Interaction tactile sur le PFD – Proline Fusion sur Beechcraft King Air (à gauche)
Overhead Panel tactile de Honeywell sur Gulfstream G500 (à droite)

Pour garantir l'utilisabilité de ces nouveaux systèmes en toute situation et répondre aux exigences de certification, les industriels ont proposé 3 types de solutions. Premièrement, toutes les fonctions de commande avionique disponibles via l'écran tactile sont également accessibles par un ensemble de boutons physiques associables dynamiquement à des fonctions (Figure 23.b), comme pour les interfaces « Pro line Fusion » tactiles de Rockwell Collins. Deuxièmement, le choix de dalle tactile résistive (Dodd et al., 2014) nécessite un appui physique pour confirmer une action et limiter ainsi les erreurs de validation non désirées. Enfin, pour favoriser les actions tactiles en situation de turbulences, Honeywell propose des bords d'écrans saillants (Figure 23.a) pour permettre à l'opérateur de stabiliser sa main alors que (Hourlier et al., 2019), dans le cadre de développement des futurs systèmes avioniques de Thales, présentent des recommandations de conception de gestes tactiles en fonction des niveaux de turbulences.



Figure 23. Interaction tactile avec stabilisation de la main sur le bord de l'écran - G500 (à gauche)
Panneaux de boutons physiques permettant d'agir sur les écrans tactiles - G500 (à droite)

Aucun fabricant n'a pour l'instant réussi à démontrer que les performances en tactile uniquement seraient au moins de même niveau qu'avec les interfaces physiques des systèmes précédents et ce dans toutes les conditions aéronautiques (turbulences, vibrations, perte de visibilité...)

Comme en témoigne le développement de cette nouvelle génération de suite avionique, l'intégration des écrans tactiles dans les postes de pilotage de l'aviation commerciale offre de nombreux avantages potentiels pour les pilotes et les constructeurs aéronautiques. La manipulation directe de l'information (Barstow, 2012), (Avsar et al., 2016a), la visualisation des données agrégées sur des surfaces d'affichages étendues (Garcia-Ruiz, 2013), l'amélioration de la gestion des ressources cognitives (Hourlier, 2015), et la reconfiguration des interfaces en fonction du contexte (phase de vol, turbulence, indisponibilité d'un membre de l'équipage) ou de l'état cognitif des pilotes sont quelques exemples d'avancées indéniables pour améliorer la performance et la conscience de situation (SA) dans le poste de pilotage. Par ailleurs, la réduction du nombre de contrôleurs physiques et l'intégration de surfaces génériques facilement adaptables à des gammes de cockpits diverses (hélicoptère, avion civil ou militaire) est une opportunité de réduction des coûts pour les industriels. Néanmoins, comme nous allons le voir en détail dans la partie suivante, l'utilisation des écrans tactiles en remplacement des interacteurs physiques dans le cockpit présente des limites importantes d'utilisabilité et de performances dans des contextes particuliers (turbulence, charge cognitive élevée, saturation du canal visuelle...).

2.5 COCKPIT TACTILE : DES RISQUES POTENTIELS MAJEURS POUR LA SECURITE

Pour étudier les effets potentiels de la tactilisation des systèmes avioniques sur l'activité de pilotage nous avons réalisé un état de l'art de la littérature scientifique abordant d'une part les questions des interactions tactiles en contexte dynamique avec un partage d'attention (aéronautique, automobile, appareil tactile portable) et d'autre part les études comparatives entre des systèmes physiques et des interfaces tactiles. En confrontant les résultats de cette approche théorique aux exigences utilisateurs présentées dans la section 2.3, nous avons caractérisé les risques potentiels de la tactilisation suivant 4 ensembles : *Attention visuelle et mobilité du regard*, *Performance et charge cognitive*, *Collaboration et conscience de la situation*, *Fatigue posturale et support aux gestes*. Pour chacun de ces ensembles et afin d'initier notre travail de conception, nous avons formulé des questions de recherche sur les transformations de la surface tactile d'interaction pour minimiser les problèmes d'utilisabilité. Nous avons regroupé ces questions suivant les trois axes de recherche définis dans l'introduction (Activité oculaire (AO), Sensation et niveaux de contrôle (SC), Continuité (CO)) en les référant par le digramme correspondant.

2.5.1 Attention visuelle et mobilité du regard

Les commandes physiques dans le cockpit sont facilement localisables sans les yeux par les sens tactilo-proprioceptif des pilotes ; le souvenir incarné de la position et de la forme des boutons permet aux opérateurs d'accéder à l'instrument et de le manipuler en limitant l'utilisation du canal visuel (Cockburn et al., 2018a), (Figure 24). En revanche, comme il a été démontré dans plusieurs études [comme par exemple celles de (Buxton et al., 1985), (Tory and Kincaid, 2013), (Harrison and Hudson, 2009)], les surfaces tactiles offrant un retour tactilo-proprioceptif très faible nécessite une **attention visuelle plus importante** (saccades et fixations) pour acquérir et manipuler les objets graphiques d'interaction. Cette augmentation de l'attention visuelle est proportionnelle à la difficulté de la tâche tactile (taille et distance de la cible) comme cela a été démontré par (Large et al., 2015).



Figure 24. Actions sur le système sans le regard. A gauche, le PM règle les volets en surveillant l'extérieur. A droite le PF dirige l'avion au sol avec la main gauche sur le *Steering Handwheel* et contrôle le réglage des volets avec la main droite tout en regardant l'environnement extérieur

D'autre part, comme précisé dans la section 2.2.5, au cours d'un vol, les pilotes effectuent constamment des mouvements oculaires entre les systèmes (pour recueillir et compiler l'information) et entre l'intérieur et la vue extérieure de l'avion (pour surveiller l'environnement). L'attention visuelle requise lors de l'interaction ne doit pas pénaliser la réalisation de ces procédures réglementaires de surveillance. Dans le champ de recherche en IHM, cette question de la division de l'attention visuelle et de l'interaction tactile a été étudiée dans de nombreux contextes comme la conduite automobile, la manipulation d'appareil tactile mobile porté en situation de déplacement ou encore le paramétrage de tables de mixage de lumière ou de sons. Concernant l'utilisation d'interfaces tactiles en situation de conduite, (Bellotti et al., 2005) ont souligné une utilisation importante de l'attention visuelle, (Tsimhoni and Green, 2001) ont identifié une baisse de performance sur la tâche principale de conduite (avec plus de déviations et de changements de voie), (Noy et al., 2004) une augmentation de la charge cognitive et (Eren et al., 2018) une **faible performance de la vision périphérique**. En situation de mobilité avec un appareil portable, la division de l'attention visuelle entre l'interaction tactile et la surveillance de l'environnement génère une **surcharge cognitive** (Schildbach and Rukzio, 2010), une

baisse notable de la précision (Bergstrom-Lehtovirta et al., 2011) qui ne dépend pas de la vitesse de la marche. Enfin, pour les ingénieurs son et lumière, l'interaction tactile oblige l'opérateur à **interrompre** sa tâche de surveillance des effets générés sur la scène (Kim et al., 2016) pour ajuster ou corriger son geste de manipulation.

Ces effets de l'interaction tactile sur l'attention visuelle, soulignés dans la littérature scientifique, soulèvent d'importantes questions de design :

Questions de recherche :

- *Comment favoriser, par la transformation de la surface tactile, la répartition de l'attention visuelle entre les différentes tâches pour préserver un haut niveau de performance et une charge cognitive faible ?*
- *Comment éviter, par la transformation de la surface tactile, les interruptions des circuits visuels de surveillance des systèmes, optimiser les mouvements oculaires entre les différentes zones du cockpit et libérer l'attention visuelle de manière flexible ? (AO) (CO)*

2.5.2 Performances et charge cognitive

Comparativement à un bouton rotatif physique, (Voelker et al., 2015b) ont démontré que le réglage d'un paramètre d'une valeur initiale à une valeur cible sur un widget rotatif est **20% moins rapide avec une interface tactile**. D'autre part, l'étude note que le taux d'erreur (dépassement de la valeur cible) est significativement plus élevé en interaction tactile qu'avec le bouton physique. Ces résultats sont confirmés par ceux de (Lucchi et al., 2010) et (Kincaid, 2012) qui expliquent les performances moindres sur surface tactile par l'absence de **guide physique à l'action**. D'autre part, (Barré et al., 2014) concluent que la précision de l'action tactile dépend énormément de la **stabilisation de la main** afin de réduire l'effort physique nécessaire au pointage et au suivi du geste tactile. Enfin, (Alapetite et al., 2012) ont observé que la configuration d'un plan de vol en même temps que la réalisation d'une **tâche concurrente** présentait un taux d'erreur plus important sur une interface tactile qu'en utilisant le clavier physique du MCDU actuel (Multifunctional Control and Display Unit).

Questions de recherche :

- *Comment penser la surface tactile pour stabiliser l'action, guider le geste et favoriser la reprise de tâche ? (SC) (AO)*
- *Comment penser la surface tactile pour améliorer le couplage corps/interface et favoriser le support du corps « comme instrument » (SC)*
- *Comment transformer la surface tactile pour améliorer la réalisation de tâches concurrentes et le passage d'une tâche à une autre ? (SC) (CO)*

2.5.3 Les limites du tactile en environnement dynamique (turbulences, vibrations, accélération)

L'environnement changeant et complexe dans lequel évolue l'avion a un impact significatif sur les implications physiques et cognitives des opérateurs dans la tâche de pilotage (voir section 2.2.4). Nous avons noté au cours de l'analyse de l'activité que les effets physiques des vibrations et accélérations générées par les turbulences dans les masses d'air perturbent la perception et les gestes d'action des pilotes sur les systèmes avioniques (voir section 2.3.2). En situation d'interaction sur surface tactile ces effets peuvent avoir un impact beaucoup plus important que lors de la manipulation d'interacteurs physiques pouvant servir d'accroche ou de support à l'action. Les différents impacts de la turbulence (contexte aéronautique) ou de la vibration (contexte automobile) ont été soulignés dans de nombreuses études, comme par exemple celles de (Lin et al., 2010), (Ahmad et al., 2018), (Ng and Brewster, 2016) et (Cockburn et al., 2017) qui démontrent que la performance (vitesse de réalisation de la tâche) du tactile se dégrade en situation dynamique alors qu'avec l'interface physique elle reste stable. Ce problème de performance est aussi abordé dans l'étude de (Dodd et al., 2014) qui démontre un fort impact des turbulences en haute altitude (8000 pieds) sur le taux d'erreurs lors d'interactions tactiles. Par ailleurs, (Suijkerbuijk et al., 2017) ont constaté que lors de l'utilisation d'un PFD tactile pour modifier des paramètres de cap, niveau ou vitesse, la charge cognitive augmentait très fortement en situation de turbulence. Enfin, concernant plus particulièrement les effets de l'accélération, l'étude en laboratoire de (Le Pape and Vatrappu, 2009) et en situation réel de (Avsar et al., 2016c) ont démontré que la force d'accélération (*g-force*) avait un impact significatif sur l'utilisabilité des écrans tactiles et ce dès 1G sur l'axe vertical haut-bas (1+ Gz). Même si ces niveaux d'accélérations sont plus fréquents en aviation légère, ils peuvent se produire sur des appareils d'aviation commerciale en situation dégradée de vols (très fortes turbulences, décrochages...).

Questions de recherche :

- *Comment stabiliser la main, permettre l'accroche et assurer la continuité de réglage sur surface tactile en situation de turbulence et d'accélération ?* (SC) (AO) (CO)
- *Comment minimiser l'impact des turbulences sur l'utilisabilité des surfaces tactiles ?* (SC)

2.5.4 Postures et gestes

Comme nous l'avons observé dans la section 2.3.2 (Figure 25), la forme des interfaces ainsi que l'espace physique du cockpit sont souvent utilisés pour stabiliser ou supporter les gestes de réglages qui peuvent durer plusieurs dizaines de secondes (changement d'un cap progressivement au *Flight Control Unit* - FCU). L'absence de ce type de guide ou support physique lors de l'interaction sur surface tactile lisse peut d'après (Becouarn, 2012) provoquer de la fatigue et de

l'inconfort voire des erreurs de manipulation. Par ailleurs les études ergonomiques de (Barbé et al., 2012) sur l'utilisation de surfaces tactiles dans un contexte de cockpit, de (Fuller et al., 2008) en contexte automobile et de (Bachynskyi et al., 2015) dans un contexte plus général, ont montré que le positionnement des écrans ainsi que la durée de la tâche ont une incidence importante sur la performance et peuvent causer de la fatigue musculaire ou des troubles musculo-squelettiques (TMS).



Figure 25 : Pilotes utilisant l'environnement physique comme support à l'action. A gauche, réglage progressif d'un cap au FCU en gardant la main sur le bouton. A droite, attente de l'ordre de réglage de l'APU avec la main appuyée sur la manette des volets et le doigt sur le bouton APU.

Question de recherche :

- *Comment transformer la surface tactile pour favoriser le support à l'action et réduire la fatigue musculaire et ne pas générer des troubles musculo-squelettiques (TMS) ?* (SC) (CO)

2.5.5 Collaboration et conscience de la situation

Les gestes amples de manipulation, le positionnement des manettes, boutons et interrupteurs physiques facilitent le partage d'information et la conscience mutuelle, et favorisent la collaboration et le maintien de la conscience de la situation⁸ dans le cockpit (voir section 2.3.2). Ces bonnes propriétés des interactions dans un espace physique sont soulignées dans de nombreuses études comme par exemple celles de (Brave et al., 1998) et (Cohen and McGee, 2004) sur l'amélioration de la collaboration et de la conscience de la situation. Ou plus encore par les études de (Hutchins, 1995) et (Hornecker and Buur, 2006) sur l'utilisation de l'espace physique comme support à l'externalisation. D'autre part, l'utilisation d'objets tangibles par rapport à un environnement uniquement tactile favorise l'appropriation individuelle des outils, facilite la mise en place d'une activité de collaboration coordonnée (Speelpenning et al., 2011) et améliore la conscience des actions des autres acteurs. Enfin, comparativement au geste tactile, les gestes de manipulation de contrôleurs physiques sont plus

⁸ (Endsley, 1995) décrit 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 »

compréhensibles et partageables (Cohen and McGee, 2004). Dans ce contexte, le remplacement des actions effectuées par les pilotes avec des interacteurs physiques dans l'espace du cockpit par des interactions tactiles sur écrans peut altérer la collaboration et la conscience de la situation (SA) qui, comme (Casner et al., 2014) l'a souligné, détermine la capacité de l'équipage à reprendre le contrôle de l'appareil après le désengagement des assistances aux pilotages.

Questions de recherche :

- *Comment transformer la surface tactile pour favoriser la collaboration et améliorer la conscience de la situation ?* (SC)
- *Comment transformer la surface tactile pour supporter l'externalisation, la programmation et le séquençement.* (SC) (SC)

2.6 CONCLUSION

Ce premier travail d'analyse a permis de préciser les différentes tâches prescrites de l'activité de pilotage, de préciser l'organisation de ces tâches par les procédures standards (SOP) et de présenter plus en détail deux exemples de procédures (flows et check-list) qui ont donné l'occasion de souligner l'implication du corps des pilotes et des sens proprio-kinesthésiques dans l'activité. Une présentation de l'environnement dynamique, à la fois temporel et physique, des vols a permis de décrire le séquençement des tâches en fonction des « fenêtres d'opportunités » et d'aborder les processus cognitifs coûteux en jeu dans la compréhension et l'anticipation des transformations du système avion dans son environnement.

Pour préciser cette définition de l'activité prescrite, la présentation des résultats du travail d'analyse des données qualitatives recueillies lors des séances d'observations et d'interviews menées avec des pilotes d'avions de ligne a permis de faire émerger l'importance des gestes, des postures, des sensation TPK, de l'importance de l'espace du cockpit et de la forme des instruments dans l'activité de pilotage. L'analyse des témoignages des pilotes regroupés par catégories (*Le statut du corps dans l'activité, Utilisation de l'espace physique, La parole pour externaliser, Structure temporelle et rythmique*) nous ont permis de produire, en fin de section, une synthèse des implications du corps et de l'espace physique du cockpit dans l'activité.

Une description des évolutions des interfaces pilote-système des cockpits de l'aviation commerciale (du *classic cockpit* du DC10 au cockpit tactile du B777x) nous a aidé à appréhender les changements représentatifs opérés au cours de ces quarante dernières années : disparition progressive des interacteurs physiques, augmentation des surfaces d'affichage et développement des automatismes. La présentation de quelques exemples de cockpits tactiles certifiés ou d'études illustrent les différentes solutions mise en place par les industriels pour garantir l'utilisabilité des systèmes tactiles en condition aéronautique (turbulences, vibrations, perte de visibilité etc.). Ce constat confirme le challenge encore entier pour les industriels de produire un système avionique uniquement

tactile utilisable dans tous les contextes de vol et satisfaisant les contraintes de sécurité d'un système critique.

Enfin, un travail d'état de l'art sur les interactions tactiles en contexte dynamique avec un partage d'attention permet d'identifier des effets potentiels de la tactilisation de l'activité pilotage ; comme par exemple, l'augmentation de la charge cognitive, la baisse de performance et la surutilisation de l'attention visuelle. Face à ces risques un premier travail de formalisation de question de design a été initié, il sera réutilisé dans la partie de définition de l'espace de conception.

2.7 CONTRIBUTIONS

- *Résultats d'une analyse qualitative de l'activité de pilotage et caractérisation du statut du corps des pilotes dans les processus d'action/perception dans le cockpit.*
- *Implications pour le design de surfaces tactiles reconfigurables permettant de répondre aux exigences de l'activité de pilotage*
- *Caractérisation des risques potentiels des interactions tactiles en contexte dynamique avec un partage d'attention (aéronautique, automobile, appareil tactile portable). Spécification de questions de recherche à partir de cette caractérisation.*

3 CADRE THEORIQUE

De la surface frontière à la surface charnière pour réincarner l'interaction tactile

Visible et mobile, mon corps est au nombre des choses, il est l'une d'elles, il est pris dans le tissu du monde et sa cohésion est celle d'une chose. Mais puisqu'il se meut, il tient les choses en cercle autour de soi, elles sont une annexe ou un prolongement de lui-même, elles sont incrustées dans sa chair, elles font partie de sa définition pleine et le monde est fait de l'étoffe même du corps.
(Merleau-Ponty, 1988)

Comme nous l'avons souligné dans la section 2.3, les pilotes utilisent fortement leurs sens tactilo-proprio-kinesthésique (TPK) pour par exemple ressentir le comportement de l'appareil, vérifier la configuration des instruments, augmenter la sensation de contrôle. Le changement de posture (proprioception), le geste d'exploration, l'effleurement du bout des doigts, la direction du regard, les efforts musculaires sont autant de mécanismes mis en œuvre pour « faire corps avec l'avion » et être dans le « rythme » du système pilote/avion/environnement. En « habitant » l'espace intérieur du cockpit les pilotes exploitent pleinement leurs sensations, leurs capacités physiques et leurs connaissances approfondies de l'environnement pour percevoir et agir efficacement sur l'évolution de l'aéronef. Dans ce contexte, l'apparition dans les nouveaux systèmes avioniques de surfaces tactiles plates, rigides et lisses prive les pilotes d'un canal informationnel important. En offrant de faible retour TPK les surfaces tactiles ont pour effet, entre autres, d'augmenter la charge cognitive, de solliciter fortement le canal visuel et d'altérer la conscience mutuelle (voir la section 2.5 pour plus de détails).

Ce problème d'utilisabilité des écrans tactiles, observé dans notre contexte d'étude, est le point d'entrée du questionnement central de notre travail de

recherche : comment « ré-incarner » l'interaction sur surface tactile ? ou comment concevoir des interactions tactiles sur surface en ne limitant pas le corps de l'utilisateur à n'être qu'un œil prolongé d'un doigt (O'Sullivan and Igoe, 2004) mais en considérant la perception humaine comme un ensemble d'informations communiquant entre le cerveau, le corps et l'environnement ? Pour consolider notre approche, confirmer et enrichir les questions de recherche issues de la phase d'observation et positionner notre travail dans le domaine de l'interaction homme-machine, nous allons dans ce chapitre poser le cadre théorique de notre recherche. Nous commençons par une présentation du concept de surface, que ce soit évidemment des surfaces pour l'interaction, avec une brève histoire de la surface tactile, mais aussi du concept de surface en architecture, cinéma, peinture et psychologie de la perception. Un élargissement théorique qui nous permet d'enrichir la boîte à outils conceptuelle utilisée pour la définition de l'espace de conception des surfaces tactile reconfigurables présenté au chapitre 7. Nous avons poursuivi cette caractérisation de la surface d'interaction en étudiant le fonctionnement du toucher pour l'interaction. De la sensibilité tactile simple au système haptique (Gibson, 1966), nous mettons en lumière l'importance du corps dans son ensemble et des mouvements exploratoires dans le processus de perception tactilo-proprio-kinesthésique. Malgré la richesse perceptive des imbrications sensorielles des différents types de toucher (Gibson, 1966), nous soulignons que l'interaction tactile sur écran ne stimule que de façon parcellaire les capacités du système haptique et que les pratiques et théories actuelles pour l'interaction tactile produisent des systèmes présentant de nombreux problèmes d'utilisabilité (problèmes que nous avons observés dans notre contexte d'étude). Face à ce constat d'un corps percevant mis à distance, pour fonder théoriquement notre travail de « ré-incarnation » des interactions tactiles nous présentons les théories de la perception incarnée ainsi que les théories sur la place du corps dans le domaine de l'interaction homme-machine. Nous terminons ce chapitre par une présentation d'un état de l'art sur les transformations des surfaces tactiles ; transformations statiques par un ajout manuel de substrats et transformations dynamiques déclenchées par le système ou par l'utilisateur.

3.1 QU'EST-CE QU'UNE SURFACE TACTILE : ETUDES DES PROPRIETES DE LA SURFACE

Qu'est-ce qu'une surface ? Est-ce une limite entre deux choses ? Est-ce un moyen de cacher, cadrer, révéler ? Comment l'image, la surface et le cadre s'articulent et se répondent-ils ? C'est au travers de ces questions et de nombreuses autres que nous avons cherché à préciser le concept de surface pour mieux pouvoir le repenser. Nous commençons par détailler les propriétés de la surface tactile par une approche historique, puis nous élargissons le questionnement en présentant les propriétés et concepts de la surface dans d'autres champs théoriques, architecture, cinéma, peinture et psychologie de la perception. Pour chaque propriété isolée nous précisons en quoi elle nous a été utile pour définir le cadre de conception présenté dans le chapitre 7.

3.1.1 Une brève histoire de la surface tactile

Au travers de cette approche historique nous cherchons à faire émerger les évolutions structurelles et fonctionnelles au cours du temps de la surface d'interaction tactile. Nous allons aborder les dispositifs représentatifs et analyser leur mise en œuvre en cherchant à comprendre comment les couches de diffusion de l'image, de support de l'interaction et de capteurs se répondent, s'articulent où se fusionnent. Nous isolerons les propriétés de la surface tactile au fil du temps par le prisme du concept d'une triade support/image/capteurs.

Les premiers systèmes intégrés

Historiquement, l'invention de l'écran tactile est attribuée à E.A. Johnson en 1965 au Royal Radar Establishment à Malvern, au Royaume-Uni (Johnson, 1965). Ce premier dispositif était très proche des solutions capacitives existantes. Il présentait une surface de verre recouverte d'un conducteur d'électricité transparent (oxyde d'indium-étain) qui au contact du doigt subissait un transfert de charge électrique capté par des systèmes de mesure placés aux quatre coins de l'écran ; la détection de la valeur de cette perte de charge permettait de déduire l'emplacement du point de contact. Cette invention a finalement été adoptée par les contrôleurs aériens du Royaume-Uni et est restée en usage jusqu'à la fin des années 1990 (Johnson, 1967).



Figure 26. Écran tactile du PLATO IV, 1972 (à gauche) ; deuxième génération des écrans « AccuTouch » (à droite) ;

Présenté en 1972 par la société IBM, le PLATO IV (Figure 26 à gauche) est le premier dispositif avec un écran basé sur une technologie optique (Council, 2003). Des LEDs infra-rouge situées autour de l'écran produisaient un faisceau optique capable de déduire la position du point de contact tactile. Cet ordinateur était à but pédagogique et permettait à des étudiants de sélectionner une réponse directement sur l'écran de l'ordinateur (grâce à un quadrillage de 16X16 cases)

C'est en 1970 que le Dr. G. Samuel Hurst inventa le premier écran tactile résistif appelé « *Elograph* ». Les écrans résistifs fonctionnent avec deux feuilles flexibles transparentes sur lesquelles des lignes conductrices ont été gravées verticalement pour la feuille des X et horizontalement pour la feuille des Y. Lorsque le doigt est pressé contre l'écran, les lignes des deux feuilles entrent en contact et l'intersection donne l'emplacement précis de l'événement tactile. En 1974, le

premier véritable écran tactile doté d'une surface résistive transparente fait son apparition. En 1977, Elographics® a développé et breveté la technologie résistive à cinq fils, appelée « *AccuTouch* » (Figure 26 à droite), une technologie d'écran tactile encore utilisée aujourd'hui. Elle a notamment été choisie par Rockwell Collins pour la suite avionique du futur Boeing 777X. La contrainte de fournir un appui ferme sur l'écran pour valider un contact permet d'éviter les activations accidentelles (section 2.4.2).

Cette première époque de l'écran tactile se caractérise par une intégration assez poussée des couches support/image/capteur dans un ensemble très rigide structuré la plupart du temps autour d'une plaque de verre.

La séparation de la triade support/image/capteur

La première interface tactile multipoints fait son apparition en 1982 à l'Université de Toronto suite aux travaux de Nimish Mehta (Mehta, 1982). La *Flexible Machine Interface* présentée par ce doctorant est un système de reconnaissance optique basé sur une caméra capable de détecter les ombres des doigts à travers une surface translucide. Ce procédé (Figure 27 à gauche) a été utilisé dans de nombreux systèmes par la suite comme la première version de la table Microsoft ou le dispositif Reactable. Une lumière infrarouge a été ajoutée dans les dispositifs récents pour améliorer la détection des points de contact des doigts. Ces dispositifs, comme nous pouvons le voir dans la (Figure 27 à gauche), utilisent les systèmes de production d'image et de captation des points de contact à distance de la surface d'interaction. Un principe d'intégration qui permet d'augmenter la détection de points de contact tactiles simultanés et de favoriser le développement d'environnement mixte dans l'épaisseur du dispositif (détection d'objets physiques et affichage des données numériques sur l'environnement physique).

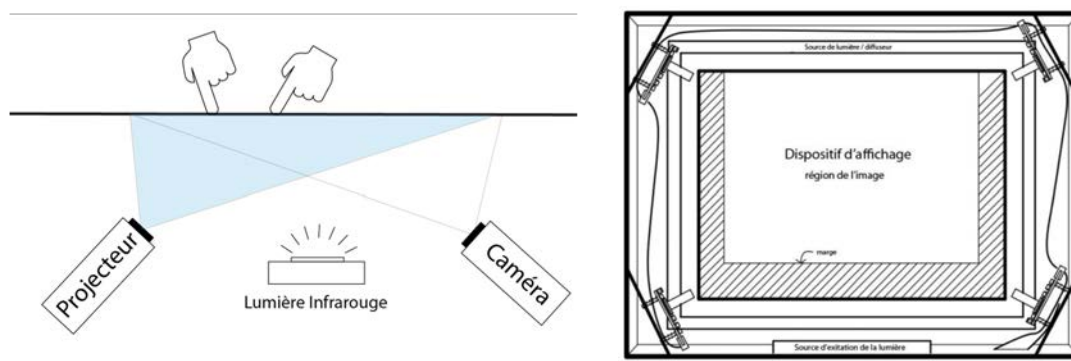


Figure 27. Schéma de principe de fonctionnement des dispositifs Flexible Machine Interface et ReactTable (à gauche) ; le cadre optique SensorFrame (à droite)

Paul McAvinney propose en 1986 *SensorFrame* (Mcavinner, 1986), un cadre optique à disposer devant un écran pour détecter jusqu'à 3 points de contact simultanés (Figure 27 à droite). Il est composé d'une source lumineuse et de quatre caméras disposées à chaque angle. Le cadre analyse la position des doigts en 2D lorsqu'ils sont à proximité de l'écran. Ce type de dispositif avec un système optique se logeant dans l'épaisseur du cadre et opérant à distance de la surface

sera repris par l'industrie pour proposer des dispositifs (vitre + cadre) permettant de tactiliser des écrans classiques.

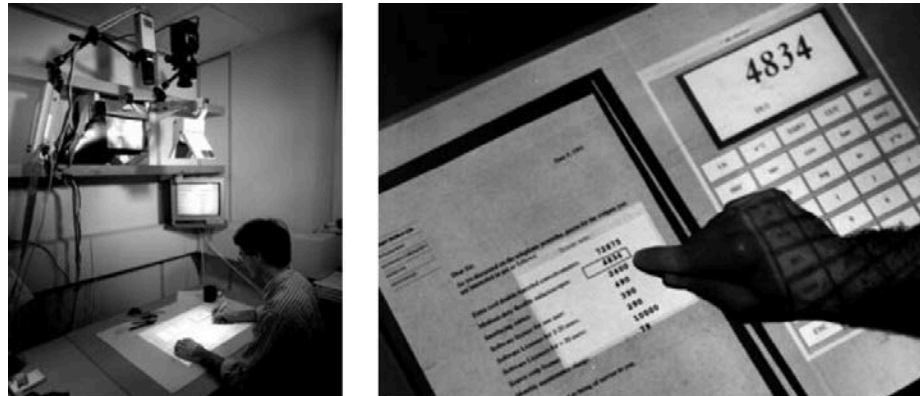


Figure 28. DigitalDesk ; une vue du dispositif dans son ensemble (à gauche); un exemple d'interaction tactile (à droite)

Toujours en utilisant les technologies de détection optique Pierre Wellner développe en 1991 un des premiers dispositifs de réalité mixte, *DigitalDesk* (Wellner, 1993). Une caméra fixée au-dessus d'un bureau permet de récupérer la position des doigts ainsi que de reconnaître des documents papier (Figure 28 à gauche). Un vidéoprojecteur, également installé au-dessus de la surface, permet d'afficher les données numériques d'interaction par-dessus l'environnement physique (Figure 28 à droite). La sélection se fait par un « tap » du doigt sur la surface, le son de l'impact étant récupéré par un microphone. La structure du dispositif reprend le principe de séparation physique de la surface d'interaction, de la source de l'affichage et des capteurs d'entrées tactiles (Figure 27.b).

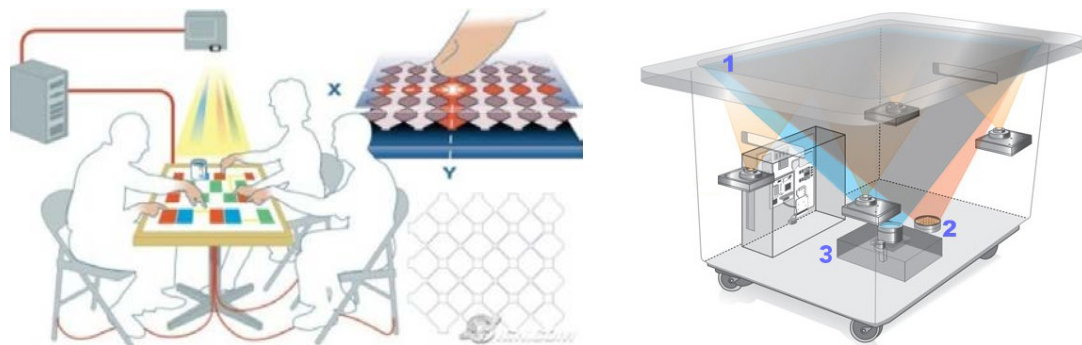


Figure 29. Table tactile MERL avec une surface capacitive et un système de boucle radio pour discriminer les utilisateurs en contact avec la surface (à gauche) ; Schéma de fonctionnement de la table Microsoft Surface T1 (à droite)

D'autres projets construits autour du découplage des dispositifs d'entrée et de sortie ont été proposés pour des contextes multi-utilisateurs. Par exemple, la table *DiamondTouch* (Dietz and Leigh, 2001), développée au MERL (Mitsubishi Electric Research Labs), est composée d'une surface tactile capacitive et d'un vidéoprojecteur (Figure 29 à gauche). Un système de boucle radio relié sur chaque chaise permet de détecter quel utilisateur touche la surface, ou encore la première version de la table Microsoft Surface (T1), basée sur la technologie

TouchLight (Wilson, 2004), qui en plus des points de contacts tactiles est en mesure de détecter des objets marqués par des étiquettes d'identification.

La séparation des composants de la triade support, image, capteurs de la surface d'interaction tactile est représentative de cette époque. L'environnement est intégré dans le système interactif par l'ajout de capteurs ; de nouveaux contextes d'usage sont explorés.

Une surface multicouche unifiée

A partir de 2005 les dispositifs tactiles industriels, pour certains issus des laboratoires de recherche, s'affinent. Les couches support-image-capteur se superposent en s'intégrant dans un système de plus en plus unifié. En 2005, Jeff Han publie un article (Han, 2005) sur un système tactile multipoints basé sur un phénomène de réflexion d'un faisceau infrarouge dans l'épaisseur d'une surface (Figure 30.a). L'illumination infrarouge se fait par les côtés d'une surface en polycarbonate transparente, les rayons ne peuvent s'échapper de la surface uniquement quand un objet ou un doigt est posé dessus, les rayons déviés sont captés et traités par une caméra extérieure au dispositif. A partir du système intégré de capteur tactile infrarouge *ThinSight* présenté en 2007 (Izadi et al., 2007), Microsoft propose la deuxième version de la table Surface ainsi que le système *Pixel-Sense* (Figure 30.b) en partenariat avec Samsung (SUR40). En utilisant une grille d'émetteurs et de capteurs infrarouge placée derrière la dalle LCD le dispositif permet la détection des contacts tactiles et des objets marqués par des étiquettes d'identification. Cette modification dans la configuration du dispositif permet de réduire considérablement le volume qui était préalablement nécessaire pour l'installation du vidéoprojecteur, des illuminateurs et des caméras infrarouges.

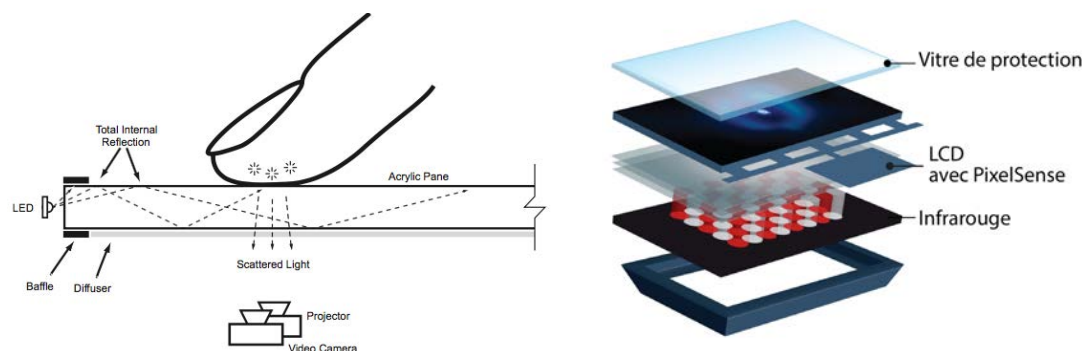


Figure 30. Schéma de fonctionnement du dispositif de Jeff Han (à gauche) ; éclaté des différentes couches du système intégré à la table Samsung SUR40 (à droite)

A la même période, les surfaces tactiles multipoints sont intégrées de plus en plus dans des dispositifs pour le grand public. Des appareils mobiles (smartphones, tablettes) aux écrans d'ordinateurs l'intégration de plus en plus fine des couches support-image-capteur ainsi que l'amélioration des seuils de détection favorisent ce développement. Plus récemment, le développement d'écrans en papier électronique ou à diode électroluminescente organique (OLED), permettent d'intégrer les différents éléments de la surface tactile dans des couches minces

et flexibles (Mone, 2013). Les écrans pliables et enroulables depuis longtemps étudiés dans les laboratoires (voir la section 3.3.2.2) sont maintenant proposés par les fabricants dans une surface composite fine et déformable. La surface d'affichage s'assouplit et s'organise suivant une structure multicouche composite qui offre un couplage amélioré entre la forme de la surface, l'image affichée et les gestes de manipulation (Figure 31.a). L'écran diffuseur de l'image n'est plus une surface opaque, il se laisse traverser par de nouveaux types de capteurs (capteurs d'empreintes (Figure 31.b), caméra, etc) ; l'image devient poreuse elle est simultanément une sortie et une entrée dans le système.

Un système intégré image/surface/capteurs permet d'envisager une surface tactile plastique et malléable. Il possède des propriétés de déformation que nous avons explorées avec le prototype *Multi-plié* « surface plissable », présenté au chapitre 6 et succinctement décrit dans l'introduction (Figure 2). Même si, dans ce prototype, le système de production d'image reste à distance de la surface d'action les pilotes percevaient la surface intégrée comme un objet manipulable à la manière d'une feuille de papier que l'on plisse, corne ou sculpte manuellement. Comme si le degré d'intégration des couches d'actuation, des modèles de déformation, des capteurs de manipulation et de l'image « invitent » l'utilisateur à agir sur la surface qui devient un objet manipulable ; un passage de la surface à l'objet manipulable par l'intégration technique. Nous retrouvons cette propriété d'intégration image/surface/capteur, indirectement, dans le principe *Couplage* de l'espace de conception *s2s* (chapitre 7).

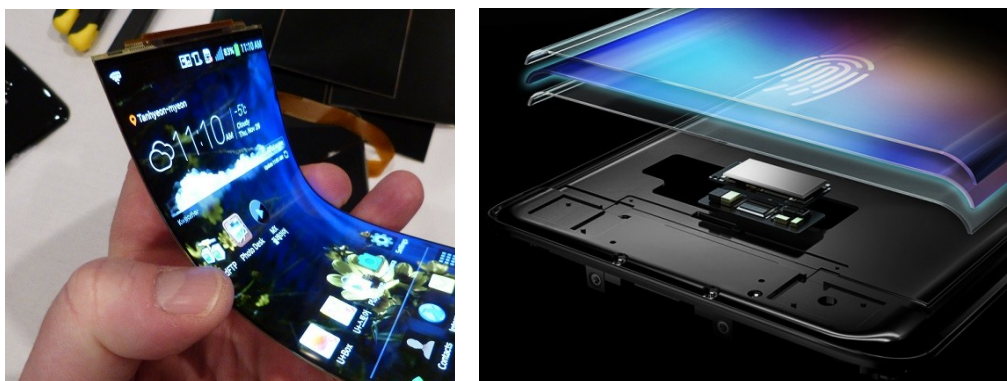


Figure 31. Écran souple tactile LG (à gauche) ; intégration d'un capteur d'empreinte sous l'écran du Samsung S10 (à droite)

3.1.2 Les concepts et les propriétés de la surface dans différents champs théoriques

Afin de s'extraire du concept technologiquement contraint de la surface tactile nous exposons ici, succinctement, des propriétés, attributs, principes de la surface en psychologie de la perception, architecture, peinture et cinéma. Nous précisons pour chaque sous-partie les propriétés que nous avons sélectionnées pour alimenter notre espace de conception présenté au chapitre 7.

3.1.2.1 Milieu, substance, surface : les propriétés de la surface en psychologie de la perception.

« C'est à la surface que l'essentiel à lieu : c'est à la surface, et non à l'intérieur de la substance que la lumière est réfléchi ou absorbée, et c'est la surface, et non l'intérieur qui touche l'animal. C'est généralement à la surface que la réaction chimique à lieu et c'est à la surface que se produit la vaporisation ou diffusion de substances dans le milieu. Enfin, c'est à la surface que les vibrations des substances sont transmises dans le milieu. » (Gibson, 1979)

Le concept de surface dans l'approche écologique de la perception de James J. Gibson est central (Gibson, 1979). C'est à la fois le sol, support de l'observateur, et les éléments de composition de l'arrangement optique ambiant. Toute-chose perçue peut être décomposée en surfaces qui s'offrent ou qui se soustraient au regard en fonction des mouvements de l'environnement ou de l'observateur. La vision ne serait pas un traitement mental de données sensorielles, comme le prétendait les théories de l'« optique physiologique » (Helmholtz, 1867), mais une interaction avec l'environnement dans laquelle nous utilisons notre corps et la locomotion pour « extraire des invariants du flux optique ». Nous pensons que les concepts de surface développés dans cette approche écologique et notamment ceux de géométrie des surfaces, d'objets attachés, de bords occluants, d'invariant et d'affordance peuvent nous permettre de caractériser les transformations d'une interface tactile reconfigurable et surtout de spécifier les effets produits dans l'activité de perception.

Théorie écologique de la perception

James J. Gibson, psychologue du XXe siècle, a développé une nouvelle théorie de la perception en s'opposant à l'idée que la vision est une simple interprétation des images projetées sur la rétine. Dans son ouvrage référence de 1979 (Gibson, 1979), Gibson propose d'étudier la perception en tentant de redéfinir « *comment nous voyons et à quoi sert ce que nous voyons* ». Pour Gibson le système de la vision ne se limite pas à un œil connecté au cerveau mais plutôt à deux « *yeux situés dans la tête au sommet d'un corps soutenu par le sol* ». La perception n'est pas une construction d'un environnement phénoménale à partir d'une « mosaïque » de stimuli mais elle s'inscrit avant tout dans l'interaction entre l'organisme et son environnement.

L'environnement signifant

Pour Gibson le terme d'environnement « s'applique aux alentours des organismes capables de percevoir ». Il insiste sur le lien de réciprocité entre organisme et environnement en précisant qu'« aucun organisme ne pourrait exister sans environnement » et qu'« un environnement est toujours l'environnement d'un organisme ». Il n'existe pas un monde physique et un temps abstrait, mais bel et bien des alentours propres aux organismes percevant et un temps rythmé par les changements que subit l'environnement.

Milieu, substances, surfaces

Gibson décrit l'environnement terrestre en termes de milieu (atmosphère

gazeux), de substance (plus ou moins substantiel) et de surface. Il définit la surface comme l'interface entre le milieu et la substance. La plus importante des surfaces pour les animaux terrestres est le sol qui est l'interface entre l'air (milieu de déplacement et de respiration) et la surface de soutien. Les différentes surfaces s'organisent suivant une géométrie qui leur est propre, articulée autour de la gravité (haut/bas) et de la surface de référence, le sol. Une surface horizontale, de niveau étendue et rigide invite au soutien : elle permet l'équilibre et le maintien posturale par rapport à la gravité. La géométrie des surfaces, leur disposition les unes par rapport aux autres ont une signification intrinsèque pour le comportement (ce que Gibson nomme *affordance*, que nous détaillerons plus loin). Un ensemble de surfaces associées peut composer un objet, détaché s'il est entouré complètement par le milieu ou attaché s'il garde un lien avec la substance d'une autre surface. C'est ce dernier concept d'objet que nous avons cherché à interroger par le prototype *Multi-plié* « plissable » en déformant la surface pour produire un objet qui reste une partie de la surface et qui peut redevenir surface (chapitre 6).

L'arrangement optique ambiant : bord occluant et invariants

L'observateur perçoit l'environnement suivant un arrangement optique particulier déterminé par sa position, l'éclairage et la capacité des surfaces à réfléchir la lumière. Les changements de la forme des surfaces, de leur emplacement, de leur texture ou encore le déplacement de l'observateur vont produire une modification dynamique de l'arrangement optique, que Gibson appelle flux optique.

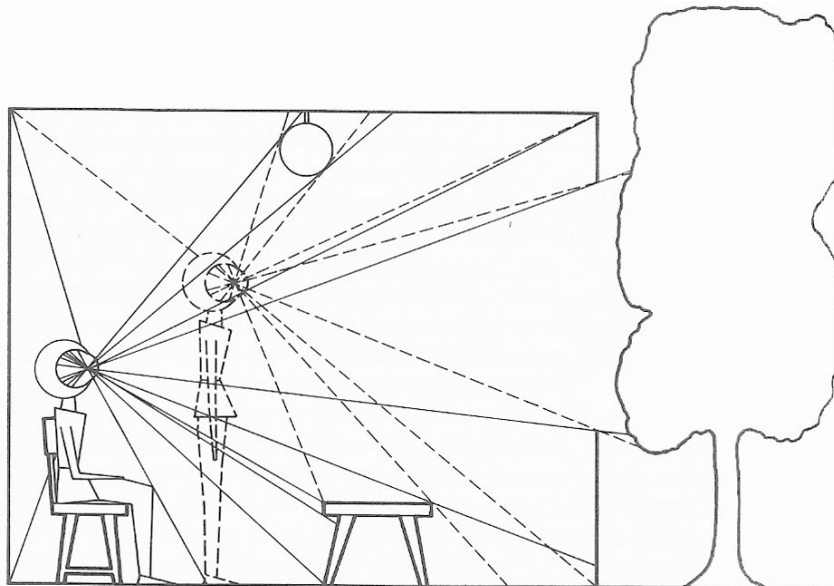


Figure 32. Modification du flux optique par le mouvement de l'observateur ; Des surfaces de la table apparaissent, certaines sont masquées et d'autres restent inchangées (Gibson, 1979)

Par exemple, comme illustré dans la Figure 32, le mouvement de l'observateur produit un flux optique qui change au fur et à mesure du déplacement. Des surfaces de la table apparaissent, certaines sont masquées par des bords occluants et d'autres restent inchangées ; ce qui ne change pas spécifie la disposition des objets dans la scène, et ce qui change renseigne sur le mouvement. Dans le cas

de cette table, les surfaces et bords visibles dans les deux positions vont subir des changements progressifs de propriétés sans rupture au cours du mouvement ; elles sont appelées invariants du champ optique. Leurs persistances sont perçues par un mécanisme de différenciation qui les isole des éléments changeants dans le flux optique (surfaces de la table qui apparaissent ou disparaissent). Nous utilisons ces concepts de bord occluant et d'invariant dans la section 7.3 (Figure 100) pour étudier les propriétés des prototypes *GazeForm* et *Multiplié* concernant les effets du couplage des surfaces entre-elles.

Affordances

Ces invariants du flux optique perçu au cours de la locomotion orientent l'action de l'observateur dans son environnement. Elles structurent ce que Gibson nomme affordances de l'environnement : « ce que cet environnement offre à l'animal, ce qu'il lui fournit ou met à sa disposition, en bien ou en mal ». Les affordances ne sont pas préexistantes dans l'environnement et décodées par le cerveau, elles se manifestent de façon saillante en terme de potentialités motrices (Noë, 2004) durant le processus de perception. Gibson utilise même le terme d'invariants d'invariants pour définir les affordances comme une articulation des invariants du champ optique et des invariants de la perception proprioceptive (perception de son propre corps) permettant à l'observateur d'évaluer les propriétés de l'environnement par rapport à son propre corps. Ce concept d'affordance trouve son origine dans certaines idées proposées par les théoriciens de la Gestalt (Koffka, 1935 ; Lewin, 1926) et a été repris et discuté par de nombreux auteurs comme par exemple (Noë, 2004) avec la notion de potentialité motrice ou encore par (Norman, 1988) et (Gaver, 1991) pour la définition des affordances perçues en IHM.

La proposition d'invitation à l'action par une re-disposition de la géométrie des surfaces a été une préoccupation dans notre processus de conception et nous a aussi permis de caractériser les effets de la transformation d'une surface sur les modalités de perception/action de nos différents prototypes (section 7.3). D'autre part ce double concept d'invariants d'invariants dans lequel Gibson décrit la perception du corps comme une surface en mouvement nous semble pertinent pour discuter la question du corps comme limite de la surface (chapitre 8).

3.1.2.2 Structure et parois, principes de Surface en architecture

Si nous reprenons la définition de la surface de Gibson, un bâtiment est composé d'un ensemble de surfaces dont la disposition forme une enceinte qui entoure le milieu. Les surfaces peuvent être horizontales ou inclinées pour supporter le déplacement et verticales pour isoler diviser et séparer l'environnement. Vue de l'extérieur les surfaces du bâtiment déclarent à la fois « son autonomie et sa participation à son environnement » (Leatherbarrow and Mostafavi, 2005). Les murs comme autant de limites clairement définies font émerger un dedans et un dehors. Des murs qui constituent autant « une enveloppe protectrice qu'une peau esthétique » (Vial, 2010). C'est ce traitement de l'enveloppe extérieure que nous allons étudier succinctement dans la suite de cette section. Notre ambition

n'est évidemment pas de mener une étude architecturale du concept de surface mais de faire émerger des traitements différents de la surface enveloppe permettant de répondre à des problématiques de liaison, de communication et d'interaction entre une structure, son environnement et ses utilisateurs. Ces principes seront utilisés pour analyser le comportement des prototypes produits et caractériser des transformations et des états de surfaces dans l'espace de design présenté dans la section 7.3.

De la surface structure à la surface libre

La fonction de la façade comme surface structure du bâtiment a pu être repensée avec l'apparition du béton armé et de l'ossature autoporteuse formée de piliers et de poutres au début du 20^{ème} siècle. Les fonctions de structure, étanchéité, isolation et ornement fusionnées dans la seule épaisseur du mur structure ont pu être séparées et désolidarisées pour s'intégrer dans une enveloppe multicouche. La façade est devenue « libre » (selon l'expression de Le Corbusier et Pierre Jeanneret) et plastique ; elle est dorénavant pensée comme une peau mince de murs légers et de baies placées indépendamment de la structure. Ainsi, les architectes ont bénéficié d'une liberté sans précédent à l'égard des contraintes physiques des matériaux et la possibilité d'un langage complètement nouveau.



Figure 33. Façade de la Villa Moller à Vienne (Adolphe Loos – 1928) (à gauche) ; fenêtre en bande de la « petite maison » de Le Corbusier (1923) permet de domestiquer la vue extérieure (à droite).

Ce nouveau traitement de la surface façade par les architectes modernes est passé dans un premier temps par une remise en question de l'ornementation qui devait être réduite au minimum, à sa plus simple expression. L'habillage du bâtiment, pour reprendre les analogies entre revêtement et vêtement de Adolphe Loos (Loos, 1979), devait se limiter à une couche d'enduit ou de peinture afin de s'approcher le plus possible d'une expression pure et vraie et en même temps protéger l'anonymat et la vie privée de ce qui se passait à l'intérieur (Figure 33 à gauche). Le Corbusier en reprenant cette lutte contre l'ornementation de la surface extérieure, proposait quant à lui un travail de la surface intérieure comme un véritable « dispositif de prise de vue » avec un traitement des ouvertures permettant de domestiquer la vue extérieure (Figure 33 à droite). Ces deux approches de Loos et Le Corbusier illustrent deux conceptions de la surface

façade à l'époque moderne ; « *un écran de séparation nécessaire sur lequel les mouvements de part et d'autre viennent buter pour le premier, un écran de contact qui n'a de sens que d'être traversé pour le second* » (Amy, 2008)

Par ces tentatives de faire disparaître la façade, par un traitement minimaliste ou par des ouvertures, les architectes modernes ont finalement révélé cette limite comme une interface à traiter. C'est dans le travail de Jean Nouvel sur le bâtiment de l'Institut du Monde Arabe en 1987 ou de la fondation Cartier (Figure 34) que nous constatons les prémices d'une nouvelle approche du revêtement. Pour le premier projet, la proposition d'une façade peau « au sens biologique du terme » (Goulet and Nouvel, 1987) témoigne de l'ambition de penser la porosité de la surface entre l'intérieur et l'extérieur. Dans le cas de la Fondation Cartier la double façade avec ce mur de verre en partie détaché de l'ensemble intègre l'environnement dans l'enceinte du bâtiment et permet de créer une limite physique floue laissant la place à un entre-deux, une épaisseur dans la surface, un espace à vivre émergeant de ces limites brouillées. Dépasser en quelques sorte « les oppositions dehors - dedans, public - privé, réel - virtuel, fonctionnel - poétique » (Amy, 2008) pour « créer un espace qui n'est pas lisible, un espace qui serait le prolongement mental de ce que l'on voit » (Baudrillard and Nouvel, 2000).

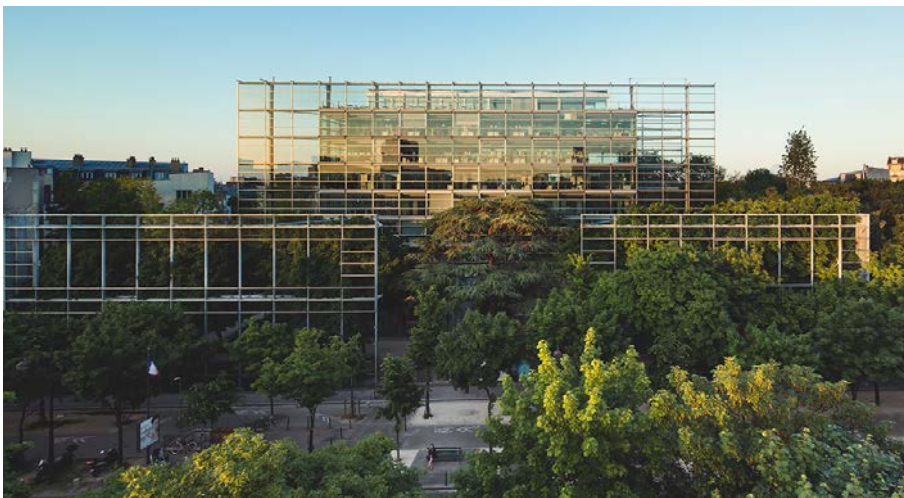


Figure 34. La façade de la fondation Cartier (Paris 1994) créée par Jean Nouvel

Avec l'*Aegis Hypo-Surface* (Figure 35 à gauche) installé sur l' *Hippodrome Theatre* de Birmingham en 1999 l'atelier d'ECOi propose une surface façade de 10 mètres de large et 3 mètres de haut capable de changer de forme en fonction des stimuli extérieurs (mouvements des visiteurs, météo, son). Avec cette surface composée de facettes triangulaires de métal articulées entre elles et déplacées par des vérins pneumatiques, la limite physique du bâtiment devient mobile, interactive, plastique et fluide ; l'activité intérieure s'affiche sur la façade. On retrouve ce jeu de transparences avec une mise en œuvre radicalement différente dans le bâtiment *Milestone* (Figure 35 à droite) de l'agence MVRDV. La façade composée de verre frittée semi transparent reflète l'environnement en même temps qu'elle rend visible des zones d'habitation. Un percement de la

surface façade relie le bâtiment à la ville en servant de cadre, de point de vue au panorama sur l'environnement.



Figure 35. Aegis Hypo-Surface de l'atelier dECOi (à gauche) ; Vue 3D du bâtiment Milestone (à Esslingen en Allemagne) de l'agence MVRDV (à droite)

Avec ces expériences de la surface poreuse entre le dedans et le dehors, la surface est maintenant question « de forces antagonistes ou convergentes, d'actions et de réactions, de luttes ou de réconciliations, de dynamiques et de mouvements et non plus de formes fixes, de stabilités sécurisantes et d'états séparés une fois pour toutes » (Amy, 2008). Les architectes abordent maintenant le problème de de surface façade comme le **questionnement d'une interaction dynamique entre un bâtiment, un environnement et des utilisateurs.**

Ces concepts de la surface en architecture entre la façade écran qui arrête le regard de Loos, qui cadre la vue extérieure de Le Corbusier ou qui peut se transformer dans son épaisseur pour aussi bien être des enveloppes volumiques que des écrans surfaciques font échos à notre propre réflexion sur la déformation de la surface d'interaction tactile dans les cockpits. Cette surface tactile arrête et bloque le regard pour permettre l'interaction (surutilisation du canal visuel) o. La surface des écrans donne à voir dans la limite de son cadre l'état et le comportement de l'avion par l'affichage des données des systèmes. Enfin la surface des tableaux de bord physiques des cockpits traditionnels qui se déploie comme une enveloppe peau séparant l'environnement extérieur de l'habitacle intérieur du cockpit donne à agir et à percevoir dans l'épaisseur de sa structure et de ses instruments physiques attachés. C'est par cette notion d'épaisseur que nous ambitionnons de repenser l'espace d'interaction tactile. Réincarner, redonner une place au corps dans les phénomènes de perception et d'action tactiles en produisant par exemple des aspérités, du relief pour structurer la perception et guider l'action ; ne plus simplement aborder la surface comme une limite à oublier mais comme un espace charnière à traiter. Nous reprenons ce concept d'espace charnière pour spécifier des capacités de déformation de la surface tactile dans la propriété rigidité/souplesse de l'espace de conception présenté au chapitre 7.

3.1.2.3 Les questionnements de la surface et du cadre en peinture

Pour Gibson, une image (peinture ou photographie) « est à la fois une surface au sens plein du terme et une présentation d'information au sujet de quelque-chose d'autre » (Gibson, 1979). On ne peut s'empêcher de voir les deux, et « nous distinguons entre la surface de l'image et la surface dans l'image ». Nous sommes en présence d'une lisière entre deux espaces (intérieur/extérieur, réel/imaginaire, vrai/fictif, matériel/immatériel, etc.). Les contours du plan dimensionnel de la surface ainsi que les bords de la représentation produisent une coupe sur le réel, une coupe interprétée en fonction des époques comme un cadre, une fenêtre, une grille, un rideau, un seuil, etc. A l'époque de la Renaissance, Alberti⁹ théorise le cadre et la perspective en peinture en décrivant « *la fenêtre* », le quadrilatère à partir duquel les lignes de fuite sont déterminées : « *Je trace d'abord sur la surface à peindre un quadrilatère de la grandeur que je veux, fait d'angles droits, et qui est pour moi une fenêtre ouverte par laquelle on puisse regarder l'histoire, et là je détermine la taille que je veux donner aux hommes dans ma peinture* » (Alberti, 1435). Il décrit l'action du peintre comme la construction d'un espace d'où l'on verra l'histoire représentée, la détermination d'un espace du cadre permettant d'isoler la scène représentée de la scène vécue. La construction d'un cadre apparaît en premier lieu comme un geste de séparation de deux espaces qui s'opposent, s'articulent, se questionnent durant toute la vie de l'œuvre. C'est à ce lien que nous allons nous intéresser dans la suite de cette section, ce lien qui a été traité de multiples manières dans les différents courants picturaux et qui sera caractérisé sous forme de concept pour être utilisé dans la construction de l'espace de design présenté dans la section 7.3.

Au XVI^{ème} siècle, la peinture « *ordonnait sa matière suivant les possibilités de la toile* » ; dans les œuvres de la Renaissance le « *contenu est réparti à l'intérieur du cadre en sorte que l'un semble là pour l'autre* », tandis qu'au XVII^{ème} siècle, « *le contenu s'est dégagé de la servitude du cadre* » (Wölfflin et al., 2017) in (Carbone et al., 2016). Cet empiètement entre l'image représentée et la limite de la surface, libérée de la force centrifuge du cadre physique ornemental, a été questionné de façon radicale dans la peinture du XX^{ème} siècle.

Les œuvres de Kasimir Malevitch, Carré noir sur fond blanc (1915), suivie trois ans plus tard du Carré blanc sur fond blanc (1918) (Figure 36 à gauche) apparaissent comme les premières tentatives de monochromes. Suivi par les œuvres de Klein et de Rothko quelques années plus tard, ce mouvement pictural cherche à réaffirmer le plan de la surface par la suppression de l'opposition des couleurs : « Nous voulons réaffirmer le plan du tableau. Nous sommes pour les formes plates parce qu'elles détruisent l'illusion et révèlent la réalité ». Ainsi reformulée, les préoccupations de la peinture ne sont plus la *mimésis*, mais : « la surface

⁹ Leon Battista Alberti, philosophe, peintre, mathématicien, architecte, théoricien des arts italien du XV^{ème} siècle

plane, la forme du support, les propriétés du pigment » (Greenberg and Gintz, 1979). Ces mêmes pigments qui sont remplacés par de la colle, du sable, de la poussière, du velours ou de la paille dans les œuvres d'Antoni Tàpies ; un travail sur la profondeur et l'épaisseur de la surface support par l'ajout de matérialité. C'est dans le mouvement Spatialisme fondé en 1950 par le peintre Lucio Fontana (Figure 36 à droite) que nous retrouvons ce même questionnement de la toile dans son épaisseur. La surface d'une toile ne doit plus seulement exister pour le regard de l'observateur qui s'abîme en elle, mais, au contraire, s'ouvrir largement aux hasards de son environnement non pictural. En griffant, perforant et incisant le plan du tableau à l'aide d'une lame de rasoir, Fontana, débordé le paradigme de la surface plate et intègre le geste, le corps de l'artiste dans l'œuvre elle-même. Une confrontation physique à la planéité de la surface pour rendre visible sa matérialité, son épaisseur et la propulser ainsi dans l'espace physique environnant.

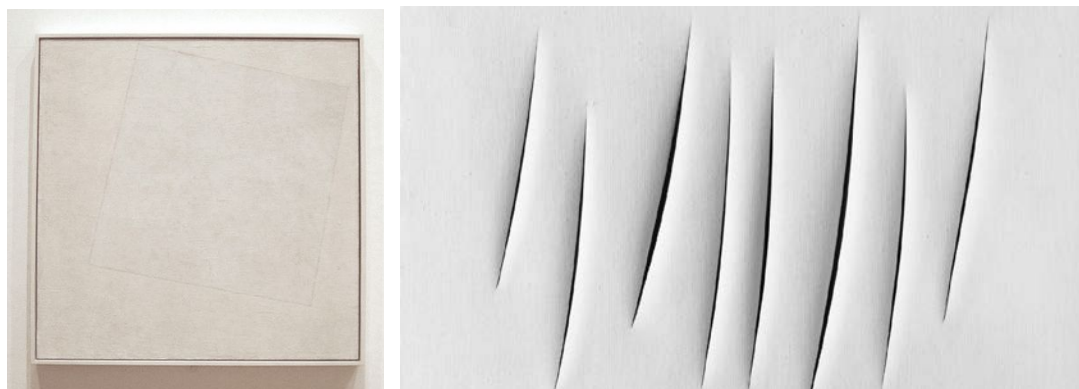


Figure 36. Malevitch, Carré blanc sur fond blanc, 1918, huile sur toile, Moma de New-York (à gauche) ; Lucio Fontana, Concetto spaziale, attese, 1965 (à droite)

Enfin, le débordement du paradigme du cadre physique du support de la représentation est présent dans les œuvres de Steven Parrino. En travaillant sur des toiles plissées percées en leur milieu ou des panneaux de bois cassés pour être installés dans l'espace d'exposition, l'artiste tente d'effacer les limites du cadre physique de ses œuvres pour se confronter à la limite du cadre de l'institution artistique.



Figure 37. Steven Parrino, rétrospective Palais de Tokyo - 2017

Dans ces quelques exemples de réalisations des mouvements picturaux du XX^{ème} siècle les tensions entre l'image et la surface se manifestent par une révélation du support, par son opacité d'une part et par son débordement d'autre part. Par son opacité, en réduisant l'image représentée à un aplat de couleur sans jeu de contraste, la surface est révélée, elle devient visible. Une relation figure / fond qui ne se joue plus uniquement dans les aplats de surfaces de l'image représentée mais entre la surface physique de l'œuvre qui en étant révélée, déformée ou encore percée, transforme l'objet tableau en une figure sur le fond du mur du lieu de monstration. Ce concept de transformation d'une surface fond (support de l'image) en surface figure a été étudié avec les prototypes *Multi-plié* et nous l'avons utilisé dans les principes de *couplage forme/image* et d'*homogénéité / hétérogénéité* de l'espace de conception des surfaces tactiles reconfigurables (section 7.3). Dans l'étude *Multi-plié* (section 6.6.1), la déformation de la surface continue couplée avec les transformations de l'image affichée s'est avérée être très puissante pour améliorer la perception visuelle. La congruence ou l'incongruence entre l'image 2D et la forme 3D permet, par exemple, de renforcer les affordances, de souligner « l'effet visuel d'une forme se détachant d'un ensemble », de voir en « vraie 3D ». La surface plate générique disparaît sous l'image affichée alors que la surface « transformée » est révélée par le couplage avec l'image. Ainsi la surface est à la fois figure et fond, la création de plis renforcée par l'image affiché génère des figures sur un fond.

3.1.2.4 La dissolution du cadre, de l'écran de cinéma à l'écran numérique

Le mouvement centrifuge, sur lequel nous avons terminé la section précédente, ce mouvement qui pousse le regard vers les bords de la surface, vers la machinerie du dispositif de monstration, est emblématique du passage du cinéma classique au cinéma moderne (Deleuze, 1985). Alors que le *hors cadre* et le *hors champs* étaient fréquemment utilisés dans le cinéma classique pour renforcer les effets narratifs, ils ont en partie disparu dans le cinéma moderne « le cinéma moderne a tué le flash-back, autant que la voix off et le hors-champ » (Deleuze, 1985). Par l'utilisation d'effets spéciaux, de *split screen* (multiple narration au sein d'un même cadre), de *surcadrage* (cadrage à travers un élément du décor) le cadre devient un contour virtuel mobile qui peut s'ouvrir, s'articuler, se déplier (Dalmasso, 2018). Un débordement systématique du cadre que l'on peut retrouver dans le procédé télévisuel avec la coexistence de plusieurs flux qui viennent se télescoper. Dès lors le cadre cesse d'être ligne de partage, lisière pour devenir charnière entre les espaces représentés et l'espace du spectateur :

« Tous mes travaux sont un discours avec la possibilité d'empiéter les bords du cadre cinématographique, pour permettre à l'image d'aller physiquement vers le spectateur, ou bien permettre au spectateur d'entrer virtuellement dans l'image » Jeffrey Shaw in (Hansen, 2006)

Pour la suite de notre travail, nous retenons le concept de *cadre charnière* ; un cadre qui n'est plus une limite entre le visible et l'invisible mais une liaison dynamique entre les espaces représentés et le corps du spectateur. Déjà abordé en architecture le concept de la surface et du cadre comme charnière questionne ici l'espace entre le visible et l'invisible non plus comme une limite mais comme une dimension. Le cadre de l'espace d'interaction tactile doit être débordé / empiété par l'image affichée mais aussi par la création de forme pour favoriser le contact avec le corps. Ainsi l'image n'est pas juste visible en deux dimensions mais est perçue dans l'espace physique par le corps. Elle sort de son cadre par la forme de l'interface pour se donner à ressentir. Il s'agit de rendre visible de l'invisible. C'est une propriété que nous avons, entre autres, observée avec le prototype *Multi-plié* « surface plissable » (section 6.6.2) lors de l'affichage d'une check-list. La création d'un pli de la surface sous l'un des items de la check-list rend visible un état, l'image affichée ne change pas, c'est uniquement sa signification qui est modifiée par la transformation du support. Ainsi la surface support donne à voir, rend visible par sa transformation, elle se plie et se déplie pour masquer / révéler, envelopper / développer, impliquer / expliquer (Deleuze, 1988). Enfin, nous retrouvons ce concept du cadre comme espace charnière entre le visible et l'invisible dans les propriétés « Favoriser la perception écologique des affordances » et « Couplage forme/image » de notre espace de conception *s2s* (section 7.3).

3.1.3 Les concepts et propriétés de la surface tactile pour l'interaction

Suite à cette première étude des propriétés de la surface dans différents champs théoriques, nous allons nous intéresser dans cette section aux propriétés de la surface dans le domaine de l'interaction homme-machine. Nous commencerons par préciser le fonctionnement du toucher pour l'interaction puis nous étudierons les propriétés des surfaces tactiles.

3.1.3.1 Le toucher pour l'interaction

Dans le cadre de cette recherche nous employons le terme de canal tactilo-proprio-kinesthésique (TPK) pour parler plus globalement des données sensorielles issues de toute l'enveloppe corporelle, des couches musculaires, des récepteurs articulaires et vestibulaire. Ce mode permet par exemple de percevoir la température, la pression, l'état de surface des objets, leur consistance, leur forme, mais également leur poids, leur structure articulaire et leur mouvement (Cadoz, 1992). Afin de préciser les différentes imbrications sensorielles mises en œuvre lors des interactions tactiles et de faire émerger leurs implications pour la conception nous allons dans la suite de cette section tout d'abord détailler le fonctionnement physiologique du toucher au niveau de la peau puis présenter l'importance du mouvement et de la proprioception dans le « système haptique » (Gibson, 1966).

La physiologie du toucher

Le système sensoriel humain peut être décomposé en deux sous-systèmes principaux : intérocepteurs et extérocepteurs. Le premier système comporte tous les capteurs qui vont nous informer du fonctionnement de nos organes internes ainsi que les positions, attitudes, mouvements de notre corps et de nos membres (proprioception). Le deuxième regroupe l'ouïe, l'odorat, la vue et les sensibilités cutanées. C'est ce système, intégré en partie dans l'épaisseur de la peau, que nous allons détailler maintenant tout en gardant à l'esprit que la sensation de toucher est le produit du tact (sensation cutanée) et de la proprioception (kines-thésie, position et mouvement de notre corps).

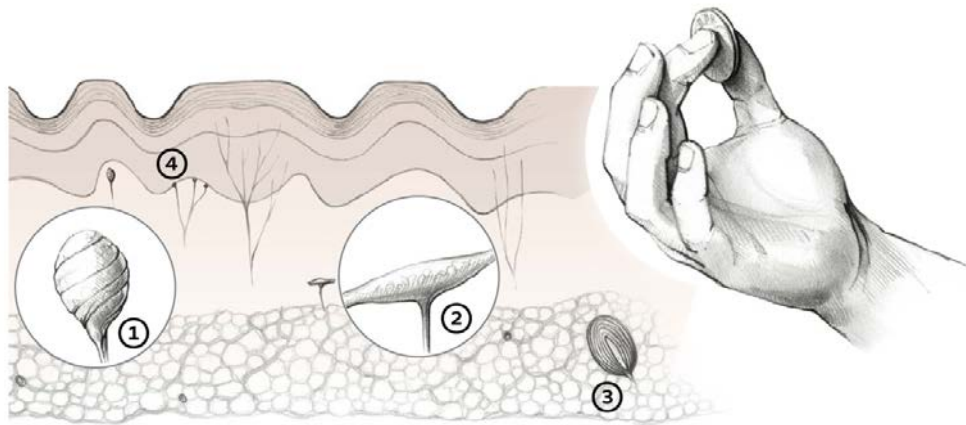


Figure 38. Anatomie de la peau et récepteurs ; 1) corpuscules de Meissner ; 2) corpuscules de Ruffini ; 3) corpuscules de Vater-Pacini ; 4) cellules de Merkel ; 5) terminaisons nerveuses libres

Au sens physiologique, la peau peut être vue comme les « limites » du corps d'un organisme vivant avec le milieu dans lequel il évolue. Elle sert d'enveloppe protectrice dans ses multiples fonctions de respiration et de régulation de la température et constitue un système sensoriel riche caractérisé par une distribution de ses récepteurs sur toute la surface du corps. Les sensations cutanées sont issues de trois différents types de récepteurs :

- Les *thermorécepteurs* détectent les changements de température de la peau ;
- Les *mécanorécepteurs* ont la capacité de ressentir la vibration, la pression et la friction ;
- Les *nocicepteurs* qui sont les vecteurs de la sensibilité douloureuse.

Les mécanorécepteurs qui nous intéressent plus particulièrement pour la détection des vibrations et des transformations de surface regroupe quatre types de cellules sensorielles (McGlone et al., 2014) :

- les *corpuscules de Meissner* (Figure 38.1) sont de petits mécanorécepteurs surtout localisés dans les régions de grandes sensibilités tactiles et peu poilues telle que la surface palmaire des doigts, la plante du pied, les paupières, les lèvres, les régions génitales externes et le mamelon des seins. Ils réagissent aux mouvements latéraux de la peau par un signal court ; ils sont très sensibles et pourraient être impliqués dans la détection des textures ;

- les *corpuscules de Ruffini* (Figure 38.2) réagissent à des étirements de la peau par des signaux de fréquence progressivement décroissante. En plus des étirements, ils détectent la pression et informent le système nerveux central sur les forces et les directions des cisaillements cutanés accompagnant un mouvement articulaire ;
- les *corpuscules de Vater-Pacini* (Figure 38.2) réagissent par des signaux courts à des changements de pression à la suite de vibrations, par exemple lorsque nous caressons une surface ondulée ;
- les *cellules de Merkel* (Figure 38.4) sont des mécanorécepteurs à adaptation lente de type I responsables de la sensation tactile fine qui détectent par leur microvillosités les déformations localisées.

Ces récepteurs qui informent le système nerveux central sur les sensations de toucher, de vibration et de tension cutanée sont sensibles aux déformations mécaniques de la peau induites par le contact des objets. Ils sont à l'origine de la sensibilité extéroceptive tactile épicrotique (discriminative) et permettent l'exploration et l'analyse du milieu extérieur. Ils ne permettent d'extraire qu'une partie des informations relatives au toucher.

La motricité et le corps dans le toucher

La définition du système tactilo-kinesthésique comme une synthèse des perceptions des systèmes sensoriels cutanés et des mouvements d'exploration fut proposé la première fois par le psychologue Geza Revesz (Revesz, 1950) sous le terme de sensation haptique. Ce concept dans un premier temps limité à la main fut élargi par (Loomis and Lederman, 1986) à d'autres parties du corps comme la langue ou par (Gibson, 1966) qui l'étend à l'ensemble du corps en présentant plusieurs types de toucher :

- *le toucher cutané* : stimulation de la peau sans mouvement des articulations ou des muscles ;
- *le toucher haptique* : stimulation de la peau avec uniquement des mouvements des articulations ;
- *le toucher dynamique* : stimulation de la peau avec des mouvements des articulations et des muscles ;
- *le toucher orienté* : stimulation de la peau avec une stimulation vestibulaire (relatif au sens de l'équilibre).

Pour Gibson, non seulement le toucher et le mouvement sont inséparables, mais, plus généralement, ce qu'il présente comme « *système haptique* », et qui pourrait être caractérisé comme le sens du toucher étendu à tout le corps (y compris les organes internes) est défini comme « *un dispositif via lequel l'individu obtient des informations à la fois sur le milieu et sur son corps. Il sent un objet par rapport au corps et son corps par rapport à un objet. C'est le système perceptif par lequel les animaux et les hommes sont littéralement en contact avec l'environnement* » (Gibson, 1966). Pour Gibson la sensation haptique ne doit pas être pensée comme une addition des informations de contact et de mouvement mais plutôt

comme « la sensation qu’a l’individu du monde qui entoure son corps en utilisant son corps » (Gibson, 1966). Avec cette approche, la limite physique entre notre corps et l’environnement n’est plus la surface de la peau en contact des objets mais se pense dans l’épaisseur et la distance entre le « corps prothétique » (ressentant pas des objets de médiation) et son environnement : « Il est un fait remarquable que lorsque l’homme touche quelque chose avec un bâton, il le sent au bout de ce bâton, et non dans la main » (Gibson, 1966).

En dépit de ces enrichissements théoriques nous observons que dans le domaine de l’interaction tactile le toucher est essentiellement sollicité en tant que prolongement de la vision, pour pointer et contrôler. En restant dans un cadre théorique de la vision comme sens premier et principal de l’interaction tactile, le toucher est réduit à une mise en contact sensoriellement pauvre de la surface de l’écran avec la surface du doigt. En effet, pour interagir on touche l’écran dans un geste qui feint de manipuler ce qui est à l’écran ; mais la main ne fait qu’entrer en contact avec l’écran. Il paraît nécessaire de déplacer ce cadre théorique en intégrant le corps entier et l’espace dans le questionnement du toucher pour l’interaction tactile. C’est ce que nous allons aborder dans les sections suivantes

Dans cette section et dans la suite de cette thèse nous retiendrons que le terme tactilo-proprio-kinesthésique réfère à la combinaison du système perceptif lié au toucher (système cutanée), à la kinesthésie (position du corps dans l’espace) et aux mouvements d’exploration.

3.1.3.2 Propriétés de la surface interactive

Surface comme dispositif d’affichage de l’écran de la station de travail, surface mixte des interfaces tangibles (TUI) (Ishii and Ullmer, 1997) ou encore surface protéiforme des interfaces organiques (OUI) (Vertegaal and Poupyrev, 2008), la surface interactive a connu de nombreuses mutations au fil des évolutions technologiques et des orientations de recherche. Tout d’abord, en nous basant sur les travaux de définition des surfaces interactives de (Coutaz et al., 2002), de la taxonomies des environnements multi-écrans (MDE) ou multi-surfaces (MSEs) de (Garcia-Sanjuan et al., 2016) et d’analyse des évolutions des surfaces d’affichage de (Bucher and Chatty, 2009) nous isolerons et détaillerons les propriétés pertinentes de la surface pour notre recherche. Dans un deuxième temps, nous préciserons les propriétés spécifiques des surfaces tactiles en termes de disposition dans l’espace du cockpit et d’accessibilité par rapport au corps percevant et agissant. Ces propriétés ont nourri notre travail de conception des prototypes *GazeForm* (chapitre 5) et *Multi-plié* (chapitre 6) ; nous les utiliserons dans le chapitre 7 pour définir notre espace de conception des surfaces tactiles reconfigurables.

Attributs et propriétés des surfaces interactives

Comme nous l’avons vu dans la brève histoire de la surface tactile (section 3.1.1) les travaux de recherche couplés aux évolutions technologiques ont permis

d'explorer de nouveaux paradigmes d'interaction. Nous retrouvons ce découpage historique des interfaces utilisateurs en fonction des technologies d'affichage dans l'article de (Vertegaal and Poupyrev, 2008) sur les interfaces organiques (Figure 39).

Display Technology	CRT	LCD	HUD/ 3D	Projection/ Haptic	E-Ink Flexible and Kinetic
User Interface	GUI	Ubicomp and Context-Aware	VR/AR and Wearables	TUI	OUI

Figure 39. Évolution des technologies d'affichage et développement des interfaces utilisateurs

A partir de la vision de Marc Weiser (Weiser, 1991) sur l'informatique ubiquitaire et l'apparition du LCD (dispositif d'affichage transportable) la surface d'affichage a pu s'affranchir du support du bureau pour être transportée, intégrée à des objets, insérée dans l'environnement (**Figure 39**). Elle est devenue interactive en offrant des modalités d'entrées comme le toucher ou le geste. Certaines de ces surfaces sont solides et suffisamment grandes pour collaborer (Rekimoto, 2002), alors que d'autres sont souples et légères comme des feuilles de papier (Holman et al., 2005) ou transparentes pour voir à travers et rigides pour supporter les gestes de toucher de l'utilisateur (Roo and Hachet, 2017). Elles sont diverses et multiples mais comme le souligne (Coutaz et al., 2002) « *elles entretiennent avec nous des relations d'interaction : toute surface s'appréhende par les sens, se manipule par nos actes moteurs et sert un objectif* ». Cette approche centrée sur l'interaction et non sur la matérialité ou l'état physique de la surface interactive nous a semblé intéressante pour éviter l'écueil d'une analyse techno ou matériau-centré des surfaces. Nous allons donc dans la suite de cette section décrire le processus d'articulation de (Coutaz et al., 2002) entre attributs / modalités / propriétés des surfaces interactives et pour chaque étape nous spécifierons les enrichissements nécessaires pour pouvoir décliner cette articulation dans notre domaine d'étude et l'utiliser pour structurer l'espace de conception *s2s* présenté au chapitre 7.

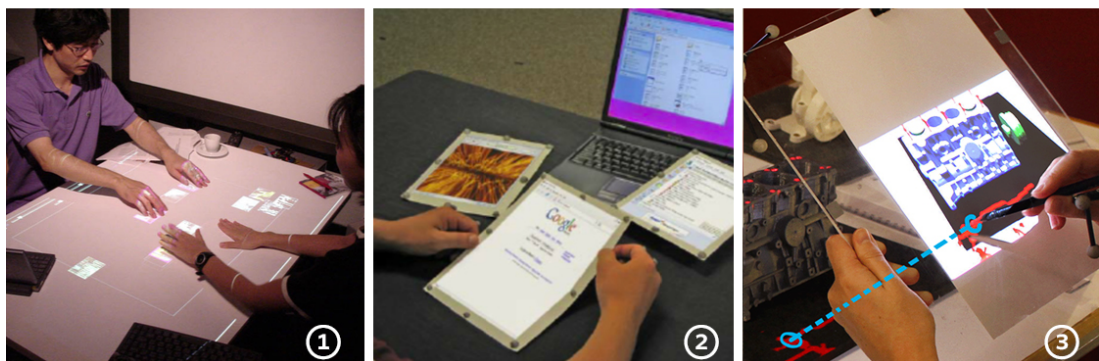


Figure 40. Exemples de surfaces interactives ; 1) SmartSkin de (Rekimoto, 2002) ; 2) PaperWindows de (Holman et al., 2005) ; 3) One Reality de (Roo and Hachet, 2017)

Attributs physiques des surfaces

Dans un premier temps, afin de comprendre la nature des surfaces interactives,

(Coutaz et al., 2002) ont élaboré une ontologie comportant trois types d'acteurs : ressources artificielles, ressources d'interaction et ressources naturelles. Ce dernier type, inspiré du Modèle du processeur humain (Card et al., 1983), permet de faire émerger deux relations : « agit sur » et « observe » qui conduisent à identifier deux catégories de surface : « les surfaces d'action » et « les surfaces d'observation ». C'est à partir de cette catégorisation et des questions qui se posent concernant le statut des surfaces et des relations entre elles que les auteurs proposent une liste non exhaustive d'attributs physiques des surfaces : *la forme géométrique (sphère, polygone, etc.), la taille (l'étendue de la forme), le poids (la masse de la surface), la matière, la texture et l'usage social (surface publique, privée, semi-privée)*. Cette liste d'attributs ne correspondant pas complètement aux comportements des surfaces tactiles reconfigurables traitées dans le cadre de notre travail de recherche, nous l'avons enrichie avec les taxonomies de (Rasmussen et al., 2012), (Roudaut et al., 2013) et (Kim et al., 2018) présentées dans la section 7.1. Les attributs : *Area, Granularity, Porosity, Curvature, Amplitude, Zero-Crossing, Closure, Stretchability, Strength, Speed* (Figure 96) se sont avérés intéressants pour préciser la description des transformations des attributs de forme, taille, matière et texture proposées dans le travail de (Coutaz et al., 2002).

Modalités d'action/perception et propriétés

Pour (Coutaz et al., 2002) les attributs de la surface interactive permettent de déduire, pour une surface donnée, ses modalités d'action et de perception. Par exemple, la table en bois du projet SmartSkin (Rekimoto, 2002) permet l'action tactile, la manipulation d'objets détectables, la collaboration et l'observation d'une image projetée alors que les feuilles de papier de PaperWindows (Holman et al., 2005) peuvent être manipulées à deux mains, pliées, déplacées ; elles permettent l'observation par le toucher et la vue (vidéo projection). Ces modalités d'observation et d'action sont traduites par (Coutaz et al., 2002) en propriétés utilisables dans le processus de conception et d'évaluation : *solidité / fluidité / nébulosité, rigidité / souplesse, opacité / transparence, hétérogénéité, inscriptibilité / effaçabilité, mobilité, accessibilité, couplage et compatibilité*. Dans le cadre de notre travail nous avons repris les propriétés d'*Homogénéité/hétérogénéité, Rigidité/souplesse, Accessibilité et couplage* qui se sont avérées intéressantes pour répondre aux exigences de conception et d'évaluation de notre contexte d'étude. Les propriétés comme la *mobilité* ou l'*inscriptibilité* ne sont quant à elles pas pertinentes pour l'étude des surfaces tactiles reconfigurables fixes dans un environnement de poste de pilotage ou de conduite. Pour la propriété de *couplage*, nous l'avons enrichie, d'une part, avec la notion de couplage dynamique par modification de la topologie des surfaces développée dans la taxonomie de (Garcia-Sanjuan et al., 2016) sur les MDE et MSEs ; et d'autre part avec la notion de couplage entre le contenu logique et l'espace physique disponible de la surface d'affichage proposé par (Bucher and Chatty, 2009) dans la proposition d'un modèle unificateur entre fenêtre et dispositif d'affichage.

Ce premier travail de caractérisation simplifiée de la surface interactive nous fournit une base de définition d'attributs et de propriétés des surfaces que nous

allons enrichir avec des éléments de l'analyse de l'activité et de l'état de l'art pour l'utiliser comme structure à l'espace de conception présenté au chapitre 7.

Accessibilité de la surface tactile dans l'environnement du cockpit

Dans l'espace du cockpit, contexte d'étude de notre travail de recherche, les pilotes, parfois sanglés fermement à leur siège, sont assis côte à côte, face à un ensemble d'instruments qu'il doivent pouvoir consulter et actionner sans se déplacer, uniquement en inclinant le buste et en allongeant les bras. Les contraintes environnementales (turbulences, vibrations) ainsi que les exigences de performances et de sécurité nécessitent de définir l'arrangement spatial des dispositifs en fonction de données ergonomiques permettant de garantir un confort d'utilisation et de coopération, et de réduire ainsi les risques de troubles musculo-squelettiques (TMS). Dans la suite de cette partie nous avons extrait de la littérature scientifique les propriétés d'agencement des surfaces (distance, inclinaison, etc.) permettant de garantir une accessibilité cohérente avec la tâche tactile à réaliser (durée, précision, fréquence, etc.). Ces propriétés spécifiques ont été utilisées pour concevoir les déformations des prototypes *GazeForm* et *Multi-plié* (offrir des surfaces d'actions minimisant la survenue de TMS et garantir la performance), agencer les surfaces d'interaction de la plateforme d'évaluation (4.1.4), déterminer la disposition des prototypes pour l'expérimentation contrôlée et les études subjectives, et enfin discuter avec les pilotes des idées de plasticité et de transformation de la surface (section 6.6.3). Elles ont en dernier lieu été utilisées pour préciser le principe « Accessibilité » de l'espace de conception présenté au chapitre 7.

Tout d'abord, concernant la propriété d'inclinaison des surfaces tactiles (Muller-Tomfelde et al., 2008) et (Schultz et al., 1998) ont conclu, suite à des études utilisateurs, qu'une inclinaison de la surface d'interaction est préférable par rapport à une disposition horizontale ou verticale : la disposition inclinée offre un meilleur confort visuel ainsi qu'une posture d'interaction moins fatigante. En ce qui concerne la première étude, l'inclinaison optimale est comprise entre 30° et 45° alors que pour la seconde l'inclinaison doit être modifiable pour s'adapter aux différentes morphologies des utilisateurs.

D'autre part, plusieurs études sur les efforts musculaires en fonction des postures lors des interactions tactiles nous ont permis d'extraire de bonnes propriétés d'accessibilité. En premier lieu, l'étude sur l'activité musculaire dans l'épaule et l'avant-bras pendant l'interaction de (Young et al., 2013) conclut que l'articulation du poignet fonctionne souvent en flexion, extension et inclinaison maximum et que les muscles extenseurs de l'avant-bras sont fortement activés dans la saisie de texte. Les surfaces doivent être positionnées suivant une inclinaison et à une distance du corps permettant de minimiser le jeu articulaire du poignet et le couplage d'une surface de stabilisation pour s'appuyer avec la surface d'interaction peut permettre de soulager les muscles du bras lors des interactions à long terme. Ensuite, nous nous sommes intéressés à l'étude comparative des efforts musculaires et des performances sur 6 types de surfaces tactiles (Bachynskyi et al., 2015) qui a permis de faire émerger des différences importantes concernant l'activation musculaire et des groupes musculo-

squelettiques entre les différentes dispositions des surfaces. Si nous considérons les postures *Laptop* et *Tabletop* (Figure 41) qui correspondent le plus aux dispositions fixes des surfaces dans un cockpit, nous pouvons conclure que la disposition inclinée sur un support horizontal offre des performances médiocres mais est adaptée à une utilisation à long terme, alors qu’une surface horizontale permet d’être performant, mais ne fournit pas un soutien de posture suffisant pour une utilisation à long terme.

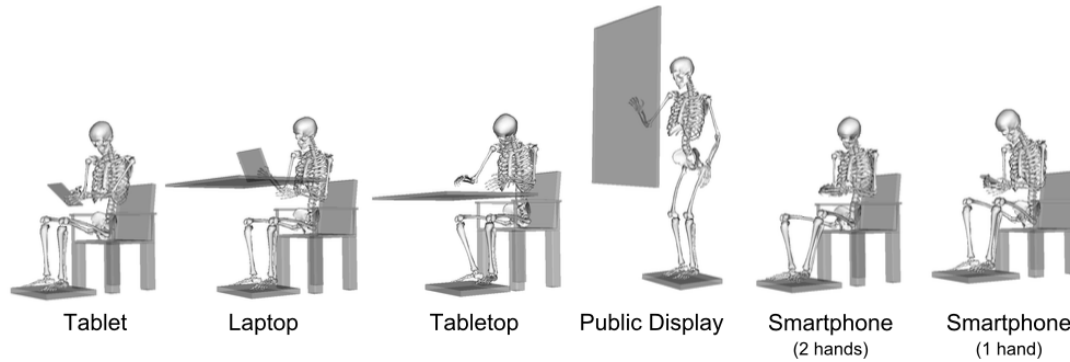


Figure 41. Les six postures étudiées par (Bachynskyi et al., 2015)

Enfin, (Barbé et al., 2013) proposent le modèle « *Touch Interaction Area Model* » de conception pour améliorer l’intégration des surfaces tactiles dans les cockpits. A partir de données existantes sur l’activité de pilotage (biomécaniques, anthropométriques, environnementales) ils spécifient un modèle 3D de disposition des surfaces d’interaction tactile dans un cockpit. Les écrans sont numérotés et ont été disposés en tenant compte entre autres de la norme ISO 7250 pour définir une zone d’accessibilité pour les interaction tactiles (Figure 42). Une version physique du modèle a été évaluée par 9 utilisateurs et des recommandations concernant les interactions ont été produites en fonction de la disposition des surfaces. Nous retenons que la disposition inclinée en face du pilote, écran D1, est appropriée pour des tâches longues (entre 30s et 60s) avec des gestes tactiles générant des contraintes posturales importantes (tronc contraint, épaule élevée, extension angulaire du poignet) ; les écrans D2 et D4, inclinés sur le côté, présentent des limites importantes pour la consultation visuelle et ne favorisent pas une précision élevée de la modalité tactile ; tandis que pour les surfaces excentrées (D5 et D6) ou au-dessus du pilote (D7 et D8) les interactions doivent être brèves, exceptionnelles et monopoint.

Pour terminer, (Jacquier-Bret et al., 2017) ont souligné que la chaîne articulaire des segments des membres supérieurs permet de développer plusieurs stratégies pour interagir avec un écran ; une approche par modèle est imparfaite et il faut autant que possible privilégier une conception centrée sur une observation du mouvement humain dans son contexte. C’est ce que nous avons essayé de mettre en œuvre pour la disposition des prototypes pour les séances d’évaluation ; les tests et discussions avec les pilotes nous ont permis d’adapter la disposition au fil des séances.

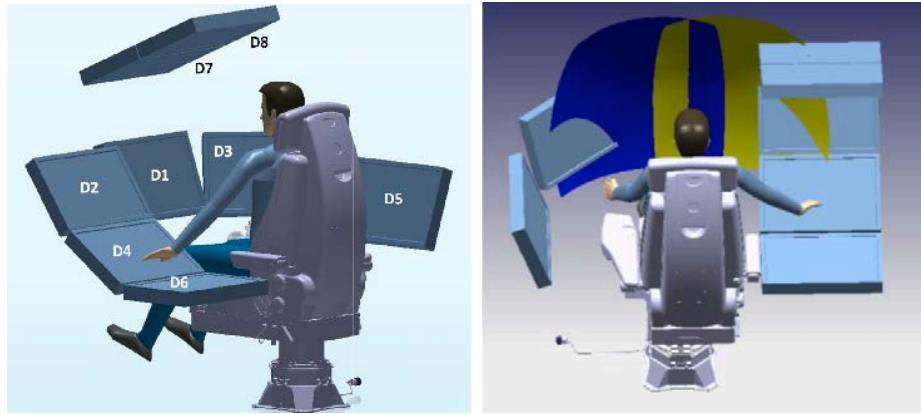


Figure 42. A gauche) maquette physique (1/2 cockpit, en position assise droite avec 8 écrans tactiles) ; à droite) zones d'accessibilité pour une interaction tactile en fonction de la norme ISO 7250

En résumé

- Nous retenons une approche de caractérisation des surfaces centrée sur l'interaction et non sur la matérialité ou l'état physique. Nous reprenons l'articulation de (Coutaz et al., 2002) entre attributs / modalités / propriétés pour structurer l'espace de design présenté au chapitre 7
- Pour l'analyse des transformations des prototypes *GazeForm* et *Multi-plié* (chapitre 7) nous utiliserons les attributs : Area, Granularity, Porosity, Curvature, Amplitude, Zero-Crossing, Closure, Stretchability, Strength, Speed. Ainsi que les propriétés : *Homogénéité/hétérogénéité*, *Rigidité/souplesse*, *Accessibilité et couplage*
- Pour la conception des prototypes et de la plateforme ainsi que pour la propriété *Accessibilité* nous retenons que l'inclinaison de la surface et la disposition par rapport au corps du pilote sont déterminantes pour définir la durée et la difficulté de l'interaction.

3.2 TRANSFORMER LA SURFACE TACTILE POUR RE-INCARNER L'INTERACTION

Alors que les réflexions autour du concept de surface ont été présentées dans les sections précédentes, nous allons dans la suite de cette partie nous intéresser à la place du corps dans les théories de la perception et de l'interaction. Nous proposons tout d'abord d'étudier plus précisément les fondements de la perception incarnée, une thématique que nous avons commencé à aborder avec les théories de James J. Gibson (Gibson, 1979) sur la perception écologique (voir section 3.1.2.1) et qui va nous permettre de mettre en lumière l'importance du corps, du mouvement et de l'environnement dans le système perceptif. Puis, en repartant de ce corps comme point névralgique du système de perception, nous étudierons en quoi les théories successives dans le domaine de l'interaction humain-machine autour des interfaces tangibles (TUI), des interactions tangibles et des interactions incarnées (TEI) peuvent nous être utiles pour re-concevoir la surface tactile ; pour « ré-incarner » la surface ; pour passer de la surface qui fait

écran, à la surface qui implique un processus perceptif avec la participation d'un corps sentant et sensible ; de la surface frontière à la surface inclusive.

3.2.1 La perception incarnée

« Si la réalité de ma perception n'était fondée que sur la cohérence intrinsèque des représentations, elle devrait être toujours hésitante, et, livré à mes conjectures probables, je devrais à chaque moment défaire des synthèses illusoire et réintégrer au réel des phénomènes aberrants que j'en aurais d'abord exclu. Il n'en est rien ». (Merleau-Ponty, 1945)

Le corps en mouvement dans une boucle de perception-action

Au XIX^{ème} siècle, la perception visuelle restait décomposable en un ensemble de sensations dont l'association était réalisée selon les règles inconscientes de l'inférence. Cette théorie de l'« optique physiologique » développée entre autre par Hermann von Helmholtz (Helmholtz, 1867) a été remise en question par les théoriciens de la Gestalt (Köhler, 1920), (Koffka, 1922) qui stipulent que les processus de la perception traitent spontanément les phénomènes comme des formes globales, structurées, plutôt que comme l'addition ou la juxtaposition d'éléments simples. Une autre forme de remise à question a vu le jour dans les travaux de Merleau-Ponty qui, en s'inscrivant dans la continuité de l'approche phénoménologique de Husserl et Heidegger, souligne le rôle du corps dans la médiation entre l'expérience interne et externe. Pour Merleau-Ponty ce qui apparaît par le corps percevant modifie la conscience. Cette reformulation de la dichotomie corps/esprit du *cogito* Cartésien place le corps sur le terrain existentiel : le corps n'est pas une mécanique neutre face à un espace objectif, il est toujours situé « dans le monde », selon des projets, des désirs, des représentations. Merleau-Ponty présente le corps comme une « instance intermédiaire » (Merleau-Ponty, 1942), un médium, « une épaisseur sensible qui est notre accès au monde, surface opaque à elle-même qui nous permet de voir » (Dalmasso, 2018) .

Par ailleurs, inspiré par les premières hypothèses de la perception incarnée du courant phénoménologique, James J. Gibson propose un développement argumenté d'une critique de la théorie classique de la perception comme « computation ». Comme esquissé à la section 3.1.2.1, d'après (Gibson, 1979), nous utilisons notre corps et la locomotion pour percevoir notre environnement. Le monde nous est connu non pas parce que nous en avons une représentation mentale mais « parce que nous vivons et agissons en lui et que nous accumulons de l'expérience » (Crawford, 2016). Cette remise en question du système perceptif par inférence(s) est très bien illustrée dans l'étude de (McBeath et al., 1995) reprise par (Crawford, 2016) sur la récupération d'une balle au vol par un joueur de baseball. Dans la théorie classique de l'optique physiologique le calcul du point de chute serait réalisé par un processus d'inférence mentale à partir des données visuelles sur la position actuelle de la balle. En fait d'après (McBeath et al., 1995) le joueur ne calcule évidemment pas la pseudo-parabole de la trajectoire de la balle pour en déduire le point de réception mais il se met à courir

de telle sorte que l'image de la balle semble se déplacer en ligne droite à vitesse constante sur son arrière-plan visuel. Les invariants, comme définis par James J. Gibson (section 3.1.2.1) de la forme de la balle défilant sur le fond sont extraits du flux optique par le mouvement et permettent de guider la vitesse et le sens de déplacement ; ce que nous percevons est guidé par ce que nous faisons. Ou, comme l'explique Alva Noë (Noë, 2004) : « la perception est une forme d'action. Elle n'est pas quelque chose qui nous arrive ou qui se produit en nous. Elle est quelque chose que nous faisons ». Une approche que nous retrouvons chez les théoriciens de la cognition incarnée (Lakoff and Nuñez, 2001) et de l'enaction (Varela, 1993) et (Luciani and Cadoz, 2007) pour lesquels la connaissance est construite sur les compétences motrices. Comme l'écrit Georges Lakoff, « la pensée est incarnée, dans la mesure où elle est fondée sur et sculptée par les systèmes sensorimoteurs et par notre interaction corporelle avec le monde ».

Enfin, on retrouve cette critique de la théorie classique de la perception dans les écrits de Paul Dourish, un théoricien plus proche du champ de l'interaction homme-machine « *Il n'y a pas d'homoncule installé à l'intérieur de notre boîte crânienne qui contemplerait le monde à travers nos yeux et qui actualiserait un plan d'action en manipulant nos mains et en s'assurant qu'elle ne passe pas à côté de la tasse de café que nous voulons saisir* » (Dourish, 2001). En s'inscrivant dans une continuité avec les approches phénoménologiques et Gibsonienne de la perception corporelle et située, Paul Dourish fonde la théorie de l'« interaction incarnée » avec la publication d'un ouvrage séminal dans le champs des IHM (Dourish, 2001). Nous reviendrons sur ces écrits dans la section suivante et verront comment les théories de la perception incarnée explicitées précédemment sont utilisées dans le champ des IHM et comment elles peuvent fonder notre processus de conception d'interaction sur surface tactile reconfigurable.

Une intelligence distribuée

Le corps percevant ne peut être considéré indépendamment de son environnement (voir section 3.1.2.1), que ce soit pour (Gibson, 1979) qui décrit la perception comme une « interaction » ou pour (Merleau-Ponty, 1945) qui écrit « notre corps est cet étrange objet qui utilise ses propres parties comme symbolique générale du monde et par lequel en conséquence nous pouvons fréquenter ce monde, le comprendre et lui trouver une signification ». L'environnement est signifiant pour les organismes qui l'habitent, il possède des caractéristiques physiques qui vont déterminer son habitabilité, ce que Gibson nomme « niche écologique ». Inversement, l'organisme peut agir sur son environnement pour le structurer et cette structure du monde agit en retour sur lui. Une utilisation de l'espace pour structurer la perception et la cognition, théorie qui a été abordée par David Kirsh (Kirsh, 1995). Nous avons pu observer ce type de comportement dans le cockpit, par exemple lors des procédures d'approche pour le réglage des altitudes cibles : le PF « demande l'altitude suivante », le PM règle l'altitude cible sur le FCU et le PF choisi son taux de descente pour atteindre la cible qui déclenchera la demande « d'affichage d'une nouvelle altitude cible ». L'utilisation de la parole, de la modification de paramètre sur le FCU et du contrôle

réciroque (*cross-checking*) sont autant de mécanismes qui permettent d'externaliser l'intelligence et de « distribuer » la cognition ; une distribution de l'activité cognitive déjà soulignée par (Hutchins, 1995) dans un contexte aéronautique. Ainsi, l'action est guidée par la perception, c'est-à-dire par une relation transactionnelle d'agent et d'environnement (Chapman, 1991). Les agents n'ont pas besoin de représenter l'environnement parce qu'ils sont couplés causalement avec lui de manière mutuellement constitutive, où l'environnement conduit au développement de gestes perceptifs qui permettent aux agents de s'orienter activement dans ces environnements (Roth et al., 2015).

Au regard de ces données théoriques et de nos résultats de l'analyse de l'activité (section 2.3) nous pouvons affirmer que les pilotes utilisent leur corps, couplé de manière mutuellement constitutive à l'environnement, dans des boucles courtes de perception/action. Le corps en mouvement utilise et structure l'environnement pour percevoir ainsi que pour distribuer et mettre à profit l'intelligence partagée du système avion/pilotes/environnement (Letondal et al., 2018). Dans ce contexte et face à l'apparition des écrans tactiles dans les systèmes avioniques, il nous paraît nécessaire de penser les interactions tactiles en intégrant les théories de la perception incarnée très tôt dans le processus de conception. Dans la section suivante nous étudions dans le domaine de l'interaction homme-machine les méthodes et modèles susceptibles de répondre à ce défi de l'incarnation de l'interaction tactile. Une incarnation pour sortir de la surface qui fait écran au regard en le sur-sollicitant et proposer une surface qui en étant agi peut en retour agir sur l'utilisateur sans nécessairement utiliser le canal visuel.

3.2.2 Le corps et la surface, les théories pour concevoir des interactions incarnées sur surface tactile

Le corps dans les théories de l'interaction

Le corps n'a pas toujours été explicitement présent dans les théories de l'interaction homme-machine. D'après (Fallman, 2003) : « basé sur un ordinateur de bureau sans jambes et sans monde, l'IHM s'est principalement intéressé à essayer de comprendre l'esprit de l'utilisateur et les implications sur le design qui en découlent. Le manque d'intérêt pour le corps n'a cependant pas été un choix conscient, mais plutôt un effet de la focalisation sur les questions mentales ». C'est tout d'abord avec le travail de (Suchman, 1987) sur les interactions situées puis à partir de la fin des années 90 avec les théories de l'interaction sur le Travail Coopératif Assisté par Ordinateur (TCAO ou *Computer Supported Cooperative Work CSCW* en anglais) que le corps humain a été explicitement discuté dans les théories de l'interaction homme-machine. D'après (Loke and Robertson, 2011), la nécessité de concevoir des systèmes permettant aux utilisateurs de collaborer a conduit à une caractérisation des comportements des organismes agissant dans des espaces partagés. Nous retrouvons cette approche, par exemple, dans les travaux de (Gaver, 1992) sur l'impact des espaces physiques sur les interactions sociales ou de (Robertson, 1997) sur une taxonomie des actions incarnées dans un espace de travail physique partagé ou encore l'étude de

(Mackay et al., 1998) sur l'importance des objets physiques sur le travail coopératif dans l'activité de contrôle du trafic aérien. Cette théorisation de la nature sociale, contextuelle, située, corporelle de l'interaction est reprise et diffusée à un public plus large dans l'ouvrage de (Dourish, 2001) sur les interactions incarnées. Paul Dourish, inspiré par la phénoménologie de Husserl, Heidegger, Schultz et Merleau-Ponty (Svanæs, 2013) définit la notion d'interaction incarnée comme « la création, la manipulation et le partage de sens au travers d'une interaction engagée avec un artefact » (Dourish, 2001). Pour discuter la nature corporelle de l'interaction incarnée Dourish utilise entre autres la phénoménologie de la perception de Merleau-Ponty comme base théorique. Cependant à la différence de Merleau-Ponty qui donne une place centrale au corps, Dourish considère qu'une interaction est incarnée à partir du moment où l'utilisateur est dans un processus transactionnel avec la technologie physiquement omniprésente dans notre vie quotidienne. Paul Dourish utilise le terme d'incarnation « en grande partie pour saisir le sens de "présence phénoménologique", la façon dont une variété de phénomènes interactifs découlent d'une participation directe et engagée dans le monde... Les leçons que je veux tirer de la perspective phénoménologique seront plus larges (et moins spécifiques) que celles qui ont principalement occupé Merleau-Ponty ». L'incarnation au sens de Dourish est un « être au monde », elle n'est pas seulement une manifestation physique, elle est déterminée par l'engagement de l'utilisateur dans un couplage transactionnel avec le monde. Ce couplage avec le monde physique est précisé par Dourish avec le rappel des théories de J. J. Gibson (présentées dans les sections 3.1.2.1 et 3.2.1) et plus particulièrement la notion d'affordance. Il utilise le terme de « Being in the Physical World » pour préciser en quoi les « actions dans le monde » nous permettent de le comprendre et comment l'environnement est agi et en même temps agit sur l'agent incarné.

L'utilisation des théories de la phénoménologie de la perception de Merleau-Ponty et de la perception écologique dans la littérature scientifique en IHM ne se limite pas au livre de Dourish, qui a cependant largement inspiré la communauté scientifique. Quelques années avant les écrits de Dourish nous pouvons citer par exemple les travaux de (Svanæs, 2001) sur l'utilisation des théories de Merleau-Ponty pour expliquer la nature holistique des expériences utilisateurs ; ou encore l'étude de Robertson (Robertson, 1997) des pratiques de travail partagé en utilisant les théories de la phénoménologie de la perception. Plus récemment, nous retrouvons les théories de Merleau-Ponty dans un large éventail de technologies et de sujets de recherche comme l'interaction tangible (Hornecker and Buur, 2006), les interactions mobiles (Fallman, 2003) ou encore les espaces augmentés (Antle et al., 2009). Durant ces années « les sujets de recherche ont surtout porté sur des questions qui vont au-delà de l'utilisabilité et de l'ergonomie, comme les dimensions esthétiques, kinesthésiques et de signification de l'expérience utilisateur » (Svanæs, 2013). Par notre travail, à la différence des travaux précédents, nous proposons d'utiliser les théories de la phénoménologie de la perception et de la perception incarnée pour concevoir des interactions et

des interfaces devant répondre à des exigences de performances et de sécurité d'un système critique.

En résumé, dans les différentes études sur la place du corps dans l'interaction nous retenons deux approches de l'incarnation exposées dans la théorie de l'interaction incarnée de (Dourish, 2001) et que nous avons déjà soulignées dans la section précédente (3.2.1) : l'incarnation comme un processus d'engagement transactionnel avec le monde (un être au monde) et l'incarnation comme possibilité d'agir et d'être agi par l'environnement. Ces approches théoriques nous semblent pertinentes pour ouvrir notre espace de possibles et ne pas limiter la conception de transformation d'une interface reconfigurable à des effets de physicalité qui ne s'inscriraient pas dans une relation co-constitutive entre le corps de l'utilisateur et le monde physique ; l'utilisateur agit sur l'interface autant qu'il est agi par elle. Pour répondre à cet objectif, et en nous basant sur l'étude du statut du corps des pilotes engagés dans une relation transactionnelle d'agent et d'environnement, nous cherchons à analyser les phénomènes d'interaction incarnée émergents pour concevoir une interface tactile reconfigurable en mesure d'offrir un support à ces phénomènes. Nous retrouvons tout au long de notre travail cet objectif de réincarner l'interaction non pas uniquement en améliorant la perception par les sens TPK mais aussi en essayant d'appréhender et de caractériser ce qui se produit entre le corps agissant et le corps qui est agi, que ce soit de façon implicite, dans les processus de conception des prototypes (section 4.1), et explicite, dans l'étude du statut du corps dans l'activité de pilotage (section 2.3) ainsi que dans l'analyse des caractéristiques des prototypes produits (chapitre 7),.

Des interfaces tangibles (TUI) aux interactions tangibles

Dans la suite de cette section, nous allons définir le domaine d'Interaction tangible dans lequel s'inscrit notre travail et isoler quelques modèles d'interactions pertinents que nous réutiliserons en partie par la suite dans les processus de conception et d'évaluation des prototypes.

A l'origine, le concept d'interface tangible TUI (Tangible User Interface) proposé par (Ishii and Ullmer, 1997) inspiré par le projet Bricks (Fitzmaurice et al., 1995) désigne les interfaces permettant d'afficher et de manipuler le contenu numérique par l'intermédiaire d'objets physiques. La récupération des actions des utilisateurs ainsi que la représentation de l'information numérique en sortie se fait par l'intermédiaire des objets dans l'espace physique. Jugée trop restrictive à la partie visible de l'interface, cette première acceptation du terme d'Interface Tangible a été élargie au concept d'Interaction Tangible par (Hornecker and Buur, 2006). Cet élargissement permet de déplacer le centre de gravité des préoccupations de la conception de l'interface à l'interaction et d'encourager la conception de système tangible comme faisant partie d'une écologie plus large située dans un contexte spécifique. Une nouvelle conceptualisation de l'interaction tangible centrée plus sur l'action humaine, le contrôle et la collaboration que sur la représentation et la transmission d'information par l'intermédiaire d'objets physiques. Cette nouvelle acceptation (Hornecker, 2009) du terme a

permis de fonder le domaine de l'interaction tangible en incluant l'ensemble des travaux sur :

- La tangibilité et la matérialité de l'interface (*tangibility and materiality*),
- L'incarnation physique des données (*physical embodiment*),
- L'interaction avec le corps entier (*whole-body interaction*),
- Le caractère embarqué de l'interface (*embedded*) et l'interaction de l'utilisateur dans des espaces et des contextes physiques réels.

Notre travail de redéfinition des interactions tactiles sur une surface reconfigurable embarquée dans un cockpit occupé par 2 pilotes utilisant leurs corps pour agir et percevoir s'inscrit complètement dans le champ des interactions tangibles. Nous allons maintenant étudier les modèles et cadres conceptuels utilisés dans le domaine des Interactions Tangibles qui se sont révélés pertinents pour structurer notre travail de conception et d'évaluation.

Les modèles d'interactions

MCRit

Par analogie au modèle Modèle-Vue-Contrôleur (MVC) (Figure 43) propre aux interfaces graphiques (*GUI - Graphical User Interface*), Ullmer et Ishii présentent un modèle d'interaction pour les interfaces tangibles (Ullmer and Ishii, 2000). Le « MCRpd » pour « *Modèle-Control-Représentation (physical and digital)* » rebaptisé « *MCRit - Modèle-Contrôle-Représentation (tangible et intangible)* » par Ullmer en 2002 (Ullmer, 2002). Cette approche, à la différence du MVC, considère les interfaces de contrôle (entrée) et de visualisation (rep-t et rep-i) non distinctes (Figure 43) ; d'autre part les interfaces de visualisation sont scindées en 2 composants différents : représentation intangible « rep-i » et représentation tangible « rep-t ».

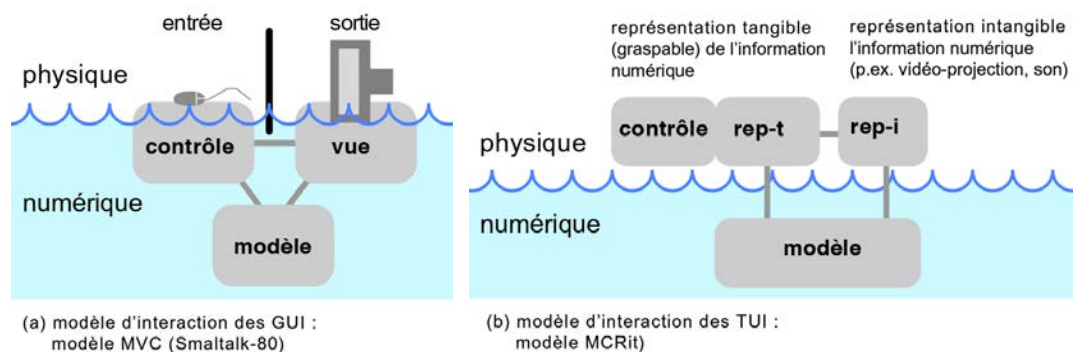


Figure 43. Modèle MVC et MCRit, reproduit de (Ullmer, 2002), traduction (Rivière, 2009)

A l'aide de ce nouveau modèle, les auteurs fournissent quatre propriétés principales permettant de caractériser les interfaces tangibles :

- *Les représentations tangibles doivent être couplées à l'information numérique sous-jacente.*
- *Les représentations physiques incarnent les mécanismes de contrôle interactif*
- *Les représentations physiques sont couplées avec les représentations numériques.*

– *L'état physique des artéfacts d'interface incarne partiellement l'état numérique du système.*

Sur un système dépendant du modèle MVC, l'utilisateur agit sur la souris ou le clavier et observe l'effet de son action sur l'écran. Cette modélisation simplifiée des boucles de rétroaction a été réalisée par (Ishii, 2008) pour les interfaces tangibles. L'auteur décrit 3 boucles différentes (Figure 44) :

- *La boucle de rétroaction tactilo-proprio-kinesthésique passive.* Cette boucle est l'effet sensoriel produit par le déplacement, la manipulation physique de l'interface ; elle ne fait pas l'objet de calculs par le système ; en utilisant une boucle semi-fermée d'actions perceptions elle favorise les actions fines d'ajustement.
- *La boucle de représentation intangible par le calcul numérique.* A partir des données des mouvements des objets ou des transformations de l'interface le système calcule et produit une rétroaction visuelle ou auditive.
- *La boucle de rétroaction physique par actualisation.* Permet de produire une actualisation de l'état physique de l'interface en fonction des évolutions de l'état numérique des données. Cette boucle permet de rendre visible les informations numériques autrement que par les rétroactions visuelles ou auditives.

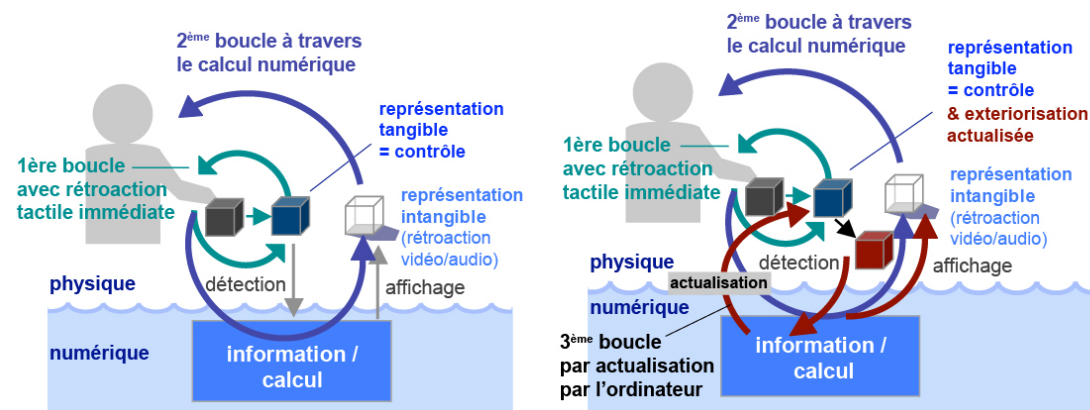


Figure 44. Boucles de rétroaction des TUIs, reproduit de (Ishii, 2008) traduction (Rivière, 2009)

Dans le cadre de notre recherche, nous retenons du modèle MCRit la propriété de couplage entre le modèle tangible et le modèle numérique. Il s'agit d'une propriété essentielle de notre espace de design (section 7.3) que nous avons par la suite enrichie, par exemple avec le couplage image/forme et le couplage geste/forme issus des séances d'évaluation des prototypes (voir sections 5.7 et 6.6). D'autre part, dans notre approche de la transformation de la surface comme objet d'interaction, le support de l'image est la partie agissable et agissante de nos systèmes : le couplage entre la représentation tangible (rep-t) et la représentation intangible (rep-i) est ainsi augmenté. Les 2^{ème} et 3^{ème} boucles de rétroaction se retrouvent en partie fusionnées. Nous utilisons les propriétés ainsi que la modélisation des boucles de rétroaction du modèle MCRit dans la discussion des prototypes réalisés pour la définition de l'espace de conception « s2s » (section 7.3).

Reality-Based Interaction

Reality-Based Interaction (RBI) (Jacob et al., 2008) est un concept unificateur de description d'interfaces post-WIMP. Les auteurs proposent de définir le monde réel suivant quatre thèmes pouvant être utilisés pour analyser la conception des interfaces post-WIMP actuelles

- *Naïve Physics (NP)* : les utilisateurs ont une connaissance sensée du monde physique.
- *Body Awareness and Skills (BAS)* : les utilisateurs ont conscience de leur propre corps physique et possèdent les compétences nécessaires pour le contrôler et le coordonner.
- *Environment Awareness and Skills (EAS)* : les utilisateurs ont une bonne connaissance de leur environnement et possèdent les compétences nécessaires pour négocier, manipuler et s'orienter dans leur environnement.
- *Social Awareness and Skills (SAS)* : les utilisateurs sont généralement conscients des autres dans leur environnement et ont les compétences nécessaires pour interagir avec eux.

Même si ces thèmes sont plutôt utilisés, par les auteurs, pour évaluer la conception des interfaces, ils nous ont été utiles de notre côté pour analyser les résultats des séances d'observation (section 2.3), guider le travail de conception et discuter les résultats de l'évaluation des prototypes (section 7.3). Nous nous en sommes servis pour produire des interfaces et des interactions qui dans certaines mesures imitent le fonctionnement du monde et favorisent les capacités humaines d'action et de perception dans l'espace. Les thèmes NP (*Naïve Physics*) et BAS (*Body Awareness and Skills*) sont notamment utilisés dans la définition de la propriété « Accessibilité » (section 7.3).

Un cadre conceptuel sur l'espace physique et l'interaction sociale

Enfin, (Hornecker and Buur, 2006) proposent un cadre conceptuel destiné à améliorer la compréhension de l'expérience utilisateur de l'interaction tangible. Ce cadre s'articule autour de quatre thèmes (Figure 45) :

- *Tangible Manipulation (TM)*, qui se réfère aux représentations matérielles avec des qualités tactiles distinctes. Elles sont typiquement manipulées physiquement dans le cas d'une interaction tangible.
- *Spatial Interaction (SI)*, qui fait référence au fait que l'interaction tangible est ancrée dans l'espace réel et que l'interaction se produit donc par le mouvement dans l'espace.
- *Embodied Facilitation (FI)*, met en évidence comment la configuration des objets matériels et de l'espace affecte et dirige l'émergence d'un comportement de groupe.
- *Expressive Representation (ER)*, se concentre sur les représentations matérielles et numériques utilisées par les systèmes d'interaction tangible, leur expressivité et leur lisibilité.

Ces quatre thèmes, comme nous l'avons déjà souligné précédemment, sont les concepts fondateurs du domaine de l'Interaction Tangible. En nous immergeant dans une approche fondée sur la perception phénoménologique et l'interaction incarnée, nous étions de fait dans cette approche étendue de l'interaction tangible au corps, à l'espace et au groupe. Nous utilisons les quatre thèmes pour analyser les prototypes produits et justifier les propriétés *Homogénéité / hétérogénéité* et *Accessibilité* de l'espace de design *s2s* (7.3).

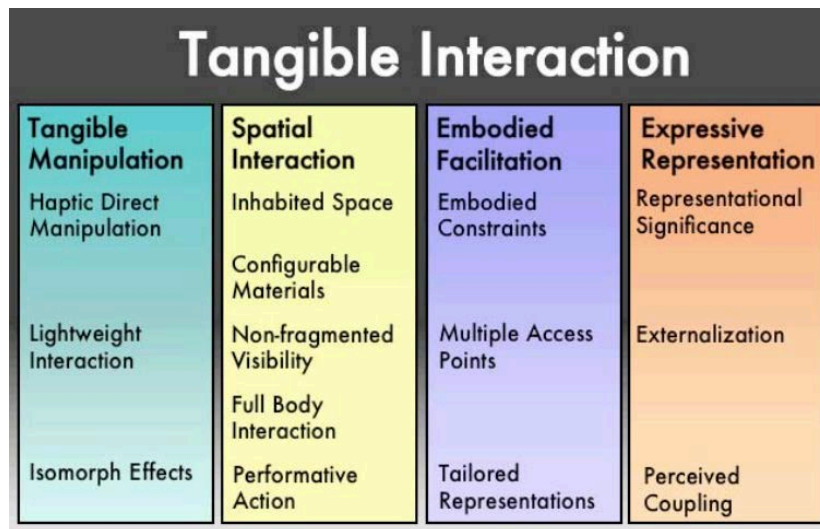


Figure 45. Framework des interactions tangibles (Hornecker and Buur, 2006)

3.3 LES DIFFERENTS TYPES DE TRANSFORMATIONS DES SURFACES TACTILES

Nous allons dans cette section présenter une synthèse du travail de recherche documentaire sur les interactions tactiles sur surfaces statiques augmentées et sur surfaces reconfigurables. Ce travail a été mené tout au long de la thèse et a permis de nourrir le processus de conception et de positionner nos orientations de recherche par rapport aux travaux connexes déjà réalisés. Les différentes sections de l'état de l'art se rapportent aux choix de conception des trois prototypes des deux études présentées dans les chapitres 5 et 6 ; nous soulignons dans cette section le positionnement de nos travaux et procédons à un rappel des états de l'art pertinents dans la présentation détaillée des études.

Nous commençons par une présentation des travaux sur la transformation d'une surface de façon « statique » par un ajout manuel d'un substrat puis nous abordons les études sur les surfaces reconfigurables dynamiquement par le système ou par l'utilisateur.

3.3.1 La surface tactile statique augmentée

L'augmentation d'une surface tactile par un guide physique a été décrite par (Buxton et al., 1985) comme une solution possible pour améliorer l'interaction tactile dans certains environnements. Les apports potentiels de ce principe en

terme de performances ont été étudiés par (Tory and Kincaid, 2013) en comparant trois modalités : physique, tactile et tactile + guide physique ; les auteurs ont conclu que les guides physiques permettaient l'interaction en limitant l'attention visuelle et qu'ils étaient plus utiles pour les widgets en forme de cadran circulaire que de curseur linéaire. Les bénéfices au niveau de l'attention visuelle ont aussi été soulignés par (Colley et al., 2016) qui ont mesuré, comparativement à une surface tactile, une sollicitation moindre de l'attention visuelle lors de l'interaction avec un écran tactile recouvert d'une plaque de plexiglas présentant des trous découpés au laser correspondant aux emplacements des widgets affichés sur l'écran (Figure 46.a). Ces résultats ont été confirmés par (Cockburn et al., 2018a) dans une étude sur les interactions tactiles dans un contexte de conduite automobile. Toujours par rapport à la vision, de nombreux travaux se sont intéressés à ce principe pour l'amélioration de l'accessibilité pour les utilisateurs aveugles ou déficients visuels (Kane et al., 2013), (Götzelmann, 2018).



Figure 46. La surface statique augmentée ; a) Guides pour actions tactiles ; b) DataTiles ; c) Guides physiques pour limiter les effets des tremblements

Par ailleurs, des augmentations de surfaces par guides physiques ont été proposées comme solution pour stabiliser mécaniquement le doigt ou le stylet dans une situation de turbulences ou de vibrations. (Cockburn et al., 2017) ont démontré que l'utilisation d'un calque physique était bénéfique pour les interactions tactiles, uniquement sur des cibles de petites tailles, en situation de turbulences aéronautiques. (Wobbrock et al., 2003) ont quant à eux démontré la pertinence de cette approche de stabilisation par un calque physique perforé pour faciliter la saisie de texte à l'aide d'un stylet pour les personnes souffrant de tremblements (Figure 46.c). (Rekimoto et al., 2001) ont établi que l'utilisation de « tuiles » de plexiglass rainurées ajoutées sur un écran permettait de faciliter la réalisation de gestes circulaires de réglage difficilement réalisable sans guide (Figure 46.b).

L'amélioration des performances, l'utilisation sans les yeux et la stabilisation de l'action tactile seraient autant d'arguments pour que ce principe nous intéresse dans le cadre de cette recherche ; cependant le caractère fixe et rigide des guides superposés à la surface d'affichage (le guide physique n'est pas modifiable dynamiquement) ne nous permet pas de répondre aux exigences de reconfigurabilité, de plasticité et d'adaptativité exprimés d'une part par les industriels pour optimiser les coûts de développement et la généricité des

nouveaux systèmes avioniques (section 2.4) et d'autre part par les pilotes pour faciliter les processus cognitifs en fonction des phases de vol.

3.3.2 La surface reconfigurable



Figure 47. La surface reconfigurable ; a) Boutons gonflables ; b) GelTouch ; c) MorePhone

Plus adaptées à nos besoins, nous nous sommes intéressés aux études sur les systèmes présentant des surfaces reconfigurables dynamiquement. Pour désigner ce type d'interfaces déformables, nous utilisons le terme d'interfaces reconfigurables défini par (Kim et al., 2018) : « dispositifs pouvant et être déformés manuellement (par les actions de l'utilisateur) ou automatiquement ». Ce type d'interface est également appelé « *malleable* » (Koh et al., 2010) (Wikström et al., 2013), « *deformable* » ou « *shape-changing* » dans la littérature scientifique. La transformation de la forme de l'interface peut être réalisée par les manipulations physiques de l'utilisateur et/ou déclenchées par le système et appliquées aux dispositifs par un mécanisme d'actuation (moteurs, air-comprimé, matériaux transformables...). Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes plus particulièrement intéressés aux interfaces offrant une surface d'interaction tactile et pouvant changer de forme pour faciliter la perception et/ou l'action en mettant à contribution nos sens haptiques et kinesthésiques ainsi que nos habiletés perceptives et motrices dans l'espace physique. Cette orientation est guidée par les exigences exposées dans le chapitre 2 et permet de répondre aux besoins des pilotes de « ré-incarnation » de l'action tactile dans une activité où le corps apparaît comme l'élément central du système perceptif. Que ce soit pour faciliter l'action tactile comme (Harrison and Hudson, 2009) (Figure 47.a) et (Miruchna et al., 2015) (Figure 47.b) ou améliorer la perception d'un état (Gomes et al., 2013) (Figure 47.c), la dynamique de la surface tactile a été l'objet de nombreuses études. Nous faisons état de ces différents travaux en fonction du type de surface et du comportement de la transformation dans les sous-sections suivantes.

Dans le domaine des interfaces reconfigurables, nous nous sommes aussi intéressés aux taxonomies comme outils pour analyser les transformations des prototypes conçus et évalués dans le cadre de notre travail de recherche. Nous pouvons citer les travaux de (Coelho and Zigelbaum, 2011) sur les déformations en fonction des matériaux, de (Rasmussen et al., 2012) sur les types de transformations et de (Roudaut et al., 2013) et (Kim et al., 2018) sur le concept de

« *shape resolution* » et la description des transformations topographiques suivante le modèle NURBS (*Non-Uniform Rational Basis Splines*). Nous reviendrons plus en détail sur le contenu de ces taxonomies dans le chapitre 7. Elles nous ont servi pour caractériser les transformations topologiques des prototypes *GazeForm* (chapitre 5) et *Multi-plié* (chapitre 6) et préciser les propriétés de l'espace de conception des surfaces tactiles reconfigurables (section 7.3).

3.3.2.1 Les surfaces articulées

De nombreuses études autour des surfaces d'affichage transformables par pliure ou par articulation se sont concentrées sur les systèmes qui peuvent être reconfigurés par l'utilisateur, à la manière d'un livre que l'on manipule à deux mains. Nous pouvons citer par exemple les recherches de (Gomes and Vertegaal, 2014) autour des « tuiles » articulées (Figure 48.a), de (Hinckley et al., 2009) sur les techniques d'interaction sur une tablette à double écran, ou encore (Khalilbeigi et al., 2012) avec un concept de surface d'affichage pliable. A la différence de ces travaux et pour répondre aux exigences de l'activité présentée dans le chapitre 2, nous ne cherchons pas à explorer la manipulation bi-manuelle de dispositifs mobile mais plutôt à concevoir des surfaces reconfigurables par le système directement intégré dans le tableau de bord.

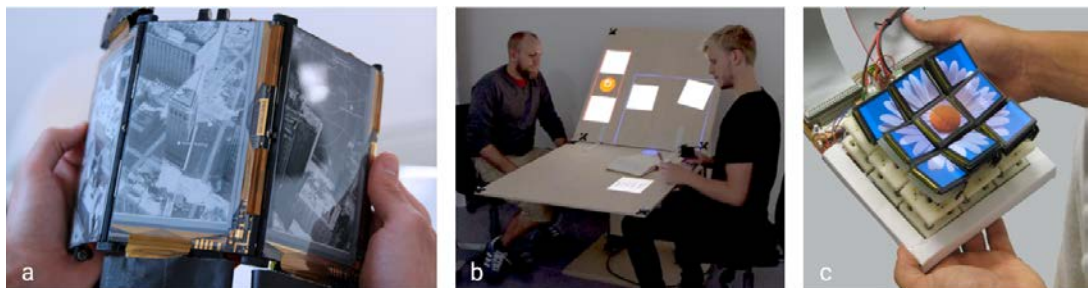


Figure 48. Études sur les surfaces articulées ; a) Paperfold : les tuiles articulées ; b) Modification de la forme d'un bureau ; c) Tilt Display

Plus proche de nos préoccupations, les interfaces articulables permettent de changer la structure physique de l'espace de travail et ainsi de modifier les processus de collaboration. (Takashima et al., 2016) ont constaté que le choix par les utilisateurs de la disposition de 3 surfaces d'affichage composant un mur d'écrans dépendait de la distance des personnes par rapport aux écrans et du contenu présenté. (Grønbaek et al., 2017) ont exploré la notion de transitions proxémiques en modifiant un espace de travail par l'articulation de deux surfaces d'affichages (Figure 48.b). Dans la continuité de ces différentes approches, nous nous sommes intéressés, dans le projet *Multi-plié* (présenté à la section 6) à l'impact de l'utilisation d'écrans articulés sur la collaboration et sur la conscience de la situation pour la gestion d'un système critique.

Enfin, (Alexander et al., 2012) présentent avec Tilt display un nouveau type d'afficheur composé de 9 petits écrans articulés, et réalisent une première étude quantitative pour comprendre les possibilités d'interaction avec un tel système. Cette définition de l'espace d'interaction nous semble intéressante et nous avons

voulu enrichir ce premier travail en étudiant l'utilisation d'écrans plus grands qui pourraient servir de surface de guidage et de reposoir pour la main au cours de l'action tactile.

3.3.2.2 Les surfaces souples

L'utilisation d'écrans pliables et enroulables pour l'affichage et l'interaction a été largement étudiée dans le champ des IHM. En particulier dans le contexte des appareils mobiles, Paperphone de (Lahey et al., 2011) étudie les gestes d'interaction pour plier un écran flexible, (Nagaraju, 2013) et (Khalilbeigi et al., 2011) définissent un espace de conception d'interaction pour les écrans déroulants.

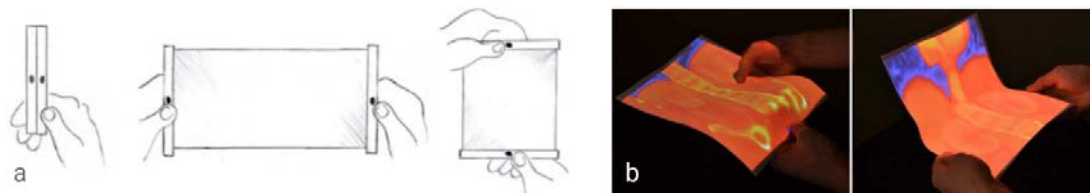


Figure 49. Exemples de surfaces souples ; a) Écran enroulable Xpaaand ; b) Flexpad, transformation d'une feuille en afficheur portable

D'autres études ont porté sur les méthodes de suivi des déformations de surfaces pour adapter l'affichage. Par exemple, les articles de (Lee et al., 2008) et (Gallant et al., 2008) utilisent le suivi de la déformation par des capteurs infra-rouge pour explorer le concept d'un écran interactif pliable, et (Steimle et al., 2013) présentent une nouvelle approche pour le suivi en temps réel de la déformation des écrans flexibles pliables à partir des images en profondeur.

Inspirés par ces travaux, nous souhaitons enrichir les connaissances déjà produites dans ce champ en étudiant un nouveau type de déformation par plissage ainsi qu'une nouvelle méthode de suivi de déformation pour adapter une image projetée au modèle physique d'une surface.

3.3.2.3 Les surfaces élastiques 2.5D



Figure 50. Les surfaces élastiques 2.5D ; a) Obake, écran souple pour manipuler des informations topographiques ; b) Étude de l'utilisation de l'élasticité en entrée ; c) Une surface en lycra fixée sur une matrice d'actuateurs linéaires

Le concept d'écran élastique déformable comme une membrane entre le monde réel et l'espace numérique a été étudié par (Watanabe et al., 2008) pour faciliter

la manipulation d'objets « *virtuels* » 3D en maintenant une relation cohérente entre l'espace physique réel et les données numériques. Cette recherche de cohérence a aussi été abordée par (Dand and Hemsley, 2013) avec le projet Obake (Figure 50.a), qui a été l'occasion de souligner que l'action directe sur la surface (par pincement, étirement ou appui) permettait d'améliorer la manipulation d'informations topographiques, en réalisant des gestes physiquement cohérents avec une navigation dans des couches de données verticales (données par niveau sur l'air, le sol et la nappe phréatique). Parmi les déformations possibles par élasticité de la surface, celles agissant sur la profondeur semble la plus pertinente pour déplacer des objets 3D dans une scène (Troiano et al., 2014) ou encore offrir une dimension supplémentaire pour permettre une interaction plus « naturelle » (Peschke et al., 2012). La résistance de la surface lors de l'enfoncement et la force qui en résulte sur le doigt permet de contrôler plus finement les actions sur le système. Enfin (Leithinger et al., 2011), grâce à une étude autour du système Relief composé d'une surface en lycra fixée sur une matrice d'actuateurs linéaires (Figure 50c), ont démontré que la combinaison de la modalité tactile avec une entrée par gestes à distance permettait de désambiguïser certaines actions difficilement réalisables en tactile sur une surface déformée. La résolution de déformation de la surface peut rendre compliqué, voire impossible, le geste tactile dans des zones qui deviennent physiquement inaccessibles.

Sculpter la surface par une action physique présente un couplage important entre l'action et les effets induits sur le système physique et sur les données numériques sous-jacentes. Cependant pour des actions tactiles précises et robustes en situation dynamique (turbulences, vibrations, accélérations) la surface élastique n'offre pas suffisamment de rigidité pour stabiliser ou guider l'action. Nous n'avons donc pas retenu l'utilisation d'une telle surface dans la suite du projet. Cependant, la force du couplage Physique/numérique portée par la malléabilité du système a été intégrée à notre espace de design et sera étudiée comme évolution possible du concept *Multi-plié*.

3.3.2.4 Les surfaces présentant des parties physiques émergentes

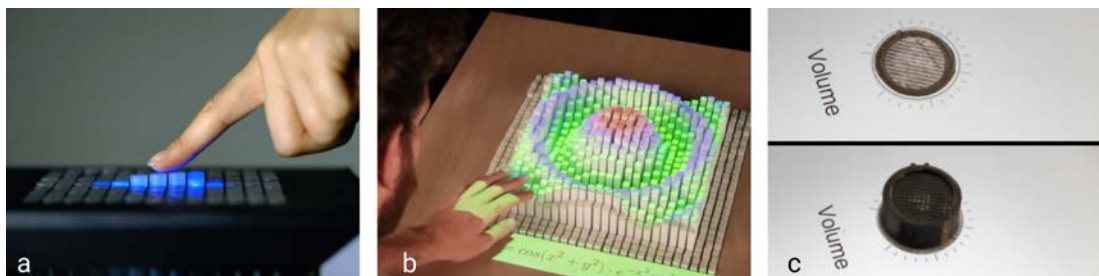


Figure 51. Études sur les surfaces émergentes ; a) Lumen b) Table tangible Transform ; c) Concept Emergeable

Le principe d'émergence d'éléments physiques pour transformer une surface plate en un affichage tangible a été décrit dans le projet Lumen (Poupyrev et al., 2004). Ce système se présente comme un affichage basse résolution, 13 par

13 pixels, où chaque pixel peut changer de couleur et se déplacer physiquement de haut en bas (Figure 51.a). L’affichage qui en résulte peut présenter à la fois des images graphiques 2D et des formes physiques en mouvement que l’on peut observer, toucher et sentir avec les mains. Lumen permet aux utilisateurs de manipuler et de ressentir physiquement des données favorisant l’implication du corps dans les processus de communication. Ce principe a été enrichi par le concept Transform (Figure 51.b) de (Ishii et al., 2015), présenté comme une matérialisation de la vision Radical Atoms (Ishii et al., 2012) sur le couplage « total » entre l’information numérique et sa manifestation physique. Ce concept a permis d’explorer le potentiel des affordances dynamiques pour créer de nouvelles possibilités d’interaction (Follmer et al., 2013) ou la pertinence de la représentation physique du corps et de ses mouvements par la table tangible dans la collaboration à distance (Leithinger et al., 2014). Enfin, en visualisation de données, le principe d’écran tangible a été utilisé par (Taher et al., 2015) pour explorer les interactions de diagramme à barres physiquement dynamiques et démontrer que ce procédé permet des interactions « intuitives, informatives et agréables ».

La force de ce concept réside dans le couplage fort entre l’information 2D et le déplacement physique des éléments de la surface. Cependant, les possibilités d’action sur le système sont limitées à des poussés/tirés verticaux sur les unités physiques de la grille, des interactions gestuelles à distance, et au toucher de la surface fragmentée. A partir de ce concept, le projet Emergeables (Figure 51.c) de (Robinson et al., 2016) a étudié la possibilité de faire émerger des contrôleurs physiques reprenant les comportements de système existants comme des potentiomètres linéaires (comme sur les tables de mixage) ou des boutons circulaires rotatifs. L’étude à partir de ces systèmes a montré les avantages des contrôleurs tangibles émergeant comparativement à des surfaces tactiles, pour réaliser des tâches sans les yeux tout en préservant un haut niveau de précision. Dans la continuité de cette étude, nous avons repris ce principe d’émergence de contrôleurs tangibles dans le cadre du projet *GazeForm*, pour étudier les effets, en termes de performances et de robustesse, de la transformation de la surface et du changement dynamique de la modalité d’interaction (tactile/contrôleur physique rotatif). De plus, la création de forme à partir du déplacement d’un élément d’un ensemble nous a permis d’explorer les effets d’une surface discontinue sur la performance de l’interaction tactile.

3.3.2.5 La surface haptique (vibro-tactile)

Au vu des nombreuses études sur le sujet, le feedback haptique par vibration d’une surface tactile semble une direction intéressante pour enrichir les sensations physiques. En effet, cet ajout d’une nouvelle dimension tactile, par l’utilisation d’un film piézoélectriques ultra-mince (Bernard et al., 2015) (Casset et al., 2014), a été étudiée dans le projet de recherche FUI TOUCHIT (Tactile Open Usage with Customized Haptic Interface Technology) lancé en 2012. Ce projet a favorisé l’essor de la solution industriel Hap2U (Chappaz and Vezzoli, 2018) permettant d’intégrer un film haptique aux surfaces tactiles existantes ; un

récent accord de partenariat avec Daimler® confirme la pertinence de cette solution pour favoriser l'interaction sans les yeux dans un contexte de conduite automobile. Par ailleurs, toujours dans le contexte automobile, (Pitts et al., 2009) ont démontré que la combinaison de feedbacks visuels, auditifs et haptiques par vibration était subjectivement préférable au seul feedback visuel. (Richter et al., 2010) ont quant à eux souligné que le feedback haptique par vibration permet d'une part, de réduire le taux d'erreur d'entrée en améliorant le temps global de réalisation des tâches, et d'autre part de diminuer la demande d'attention visuelle pour les petites cibles. Enfin, en s'éloignant un peu de la surface, (Harrington et al., 2018) ont confirmé l'intérêt des feedbacks par Ultra-sons (vibrations de l'air) à distance pour réaliser des tâches de réglage de type slider.

Cependant, ce type de rétroaction basée sur une propagation d'ondes vibratoires peut d'après l'étude physiologique de (Dutu, 2015) entrer en conflit avec des environnement très exposés aux vibrations et poser des problème de seuil de détection. Ce point a été en partie confirmé lors d'une séance de design Walkthrough par un pilote qui a reconnu ne pas sentir les vibrations de sa montre connectée en vol « [dans un environnement où] ça vibre de partout, les petites vibrations tu les sens pas ». Par ailleurs, les gains de l'haptique par vibration de surface sur la demande d'attention visuelle sont à relativiser lors de l'utilisation de widget de petit taille (Richter et al., 2010) ou pour des interactions sur des écrans de plus de 9 pouces (Ng et al., 2017; Ng and Brewster, 2017). En effet, la taille réduite de l'écran permettrait d'après (Cockburn et al., 2018b)

de positionner grossièrement sa main à l'aide des bords et d'aller progressivement vers la zone présentant un feedback haptique.

Comme précisé dans la section 2.2.4 sur l'environnement dynamique de l'activité de pilotage, le cockpit est exposé à des vibrations provenant à la fois du déplacement de l'avion dans les masses d'air, de l'écoulement des flux sur le fuselage et du fonctionnement des moteurs. Dans ce contexte riche en phénomènes vibratoires et avec la contrainte de ne pas produire de rétroaction ambiguë risquant de tromper les sens des pilotes, nous avons décidé pour l'instant de ne pas explorer plus avant l'augmentation de la surface par un système haptique par vibration. Néanmoins, une piste intéressante pour les travaux futurs serait de caractériser les différentes vibrations ressenties dans un cockpit et de déterminer les conflits possibles avec un système haptique.

3.4 CONCLUSION

Au travers de ce travail de définition d'un cadre théorique, nous avons cherché à faire émerger des concepts, modèles, cadres conceptuels nous permettant de fonder notre approche de réincarnation de l'interaction tactile. Par l'étude du concept de surface, nous avons identifié les propriétés pour analyser les prototypes d'interfaces reconfigurables *GazeForm* et *Multi-plié* (chapitre 5 et 6) et argumenter les principes de l'espace de conception *s2s* (section 7.3). Nous retenons, entre autres, que le degré d'intégration multicouches de la triade

image/surface/capteurs favorise la perception de la **surface comme objet** ; que le degré de fermeture d'un ensemble de surfaces associées définit **un objet** ; que la modification de l'arrangement topologique des surfaces produit des invariants favorisant la **perception des affordances** ; que la surface n'est pas une simple limite mais un **espace charnière** à traiter dans son épaisseur ; que la surface peut être **un fond ou une figure** ; que la surface est un **cadre charnière entre visible et invisible**, une liaison dynamique entre les espaces représentés et le corps du spectateur. Autant de concepts qui nous permettent de re-penser la surface dans son épaisseur, dans sa dimension articulatoire entre visible/invisible, physique/numérique, fond/figure, surface/objet.

L'étude physio-psychologique du toucher révèle l'importance du corps dans son ensemble et des mouvements exploratoires dans le processus de perception tactilo-proprio-kinesthésique. Le toucher ne se limite donc pas à la sensation du contact de la peau avec la surface. Nous proposons de « ré-incarner » l'interaction tactile en intégrant les compétences motrices des utilisateurs, leurs connaissances sensées du monde physique et leurs aptitudes aux relations transactionnelles avec leurs environnements dans le processus de conception des transformations de la surface tactile. Par l'étude des théories de la perception incarnée, de l'intelligence distribuée, de l'interaction tangible nous constituons une boîte à outils théorique ; boîte à outils utilisée pour analyser les prototypes d'étude (*GazeForm* et *Multi-plié*) (chapitre 7).

Enfin, nous positionnons nos orientations de conception et de recherche des études *GazeForm* et *Multi-plié* dans le domaine des interactions homme-machine et plus spécifiquement dans le champ des interfaces reconfigurables.

4 METHODES ET PERIMETRE DE CONCEPTION

La division classique qui séparait la théorie de son application ignorait cette nécessité d'incorporer les conditions d'application dans l'essence même de la théorie [...] C'est alors qu'on s'aperçoit que la science réalise ses objets, sans jamais les trouver tout faits. La phénoménoteknik étend la phénoménologie. Un concept est devenu scientifique dans la proportion où il est devenu technique où il est accompagné d'une technique de réalisation.
(Bachelard, 1938)

A partir de notre compréhension de l'activité réelle et du caractère incarné de l'activité de pilotage nous avons entrepris un travail de conception de systèmes nous permettant d'explorer les questions de recherche structurées autour des trois axes (Activité oculaire, Sensation et niveau de Contrôle, Continuité) présentées à la section 2.5. Nous utilisons le contexte aéronautique et les problèmes associés à la tactilisation des interfaces du cockpit comme un terrain d'étude propice pour repenser les interactions tactiles sur surfaces. Pour ce faire nous avons initié un processus de conception participative, intégrant des pilotes de l'aviation commerciale encore en activité opérationnelle. Nous commençons cette partie par une présentation de notre processus de conception et des différents types d'échanges mis en place avec les utilisateurs. Nous complétons cet aspect par une description de l'utilisation des prototypes physiques et de leur manipulation dans le processus d'exploration. Nous poursuivons avec une présentation technique des deux plateformes de prototypage et d'évaluation

réalisées dans le cadre du projet pour favoriser une re-contextualisation des processus dans un environnement physique « écologique » reprenant la structure d'un cockpit. Nous terminons avec la présentation de la première version d'un espace de design sur les apports des interactions tangibles et incarnées pour le cockpit ; espace de design défini autour des exigences du contexte d'étude et que nous avons utilisé comme délimitation d'un périmètre de travail dans notre approche de conception.

4.1 METHODE DE CONCEPTION

La tâche de pilotage est une activité extrêmement complexe (section 2.2) se déroulant dans un environnement dynamique difficilement appréhendable par des non-pilotes. Pour faire face à cette complexité nous avons intégré très tôt des pilotes de ligne dans le processus de conception et nous avons mis en place des méthodes de design participatif (Schuler and Namioka, 1993), (Clement and Van den Besselaar, 1993) avec les utilisateurs et l'équipe de conception du projet Airtius composée à la fois de Designers et de Chercheurs en IHM. A partir de notre théorie initiale sur l'importance du corps et des sensations des pilotes présentée dans la première version de l'espace de design, de notre travail d'analyse de l'activité autour d'observations in-situ et d'interviews contextuelles nous avons impliqué les pilotes dans un processus de « conception par l'action ». Une méthode itérative et participative centrée sur la co-fabrication et l'usage des « artefacts de conception » permet aux participants d'entrer dans un processus d'essais/erreurs propice à la manifestation de spécifications des futurs systèmes pour questionner notre théorie (Ehn, 1990). Il s'agit de faire des allers retours entre la théorie, les artefacts et les observations en utilisant des approches et méthodes de designer et de chercheurs en IHM (Mackay and Fayard, 1997)

Analyse de l'activité

La méthode de l'analyse de l'activité initiale a déjà été présentée dans la section 2.1. Nous pouvons juste rappeler ici que cette phase s'est déroulée sur 6 mois avec trois séances d'observation sur le simulateur de l'ENAC (Figure 52.b), deux séances d'entretien contextuelle sur ce même simulateur (Figure 52.c), une séance d'entretien contextuelle dans un avion léger au sol (Figure 52.a) et une séance d'observation sur un vol commercial (Annexe 10.1).



Figure 52. Séances d'observations in-situ ; a) Entretien contextuel dans un avion léger au sol ; b) Séance d'observation sur le simulateur A320 de l'ENAC

Ces observations in-situ de l'activité des pilotes dans leur cadre de travail ou de formation complétées par des interviews contextuelles ont éclairé la compréhension d'une activité complexe et ont permis de sortir d'une approche centrée sur le travail prescrit pour s'immerger dans les récits des expériences vécues des pilotes. La réalisation d'enregistrements vidéo des séances avec un ou plusieurs points de vue synchronisés a permis de partager les données avec l'équipe de conception et de réaliser des analyses spécifiques comme par exemple une typologie des gestes des pilotes (Figure 53) qui a été utilisée dans le travail sur le statut du corps dans l'activité de pilotage (section 2.3).



Figure 53. Types de gestes observés ; a) Gestes croisés ; b) Geste déictique ; c) Geste de contrôle ; d) Geste de collaboration ; e) Geste de préparation à l'action ; f et g) Postures de stabilisation

D'autre part, pour chaque séance les vidéos ont été transcrites de manière littérale et des citations pertinentes ont été isolées pour être réutilisées par exemple en introduction d'une future séance, en élément de contexte dans une séance participative, etc.

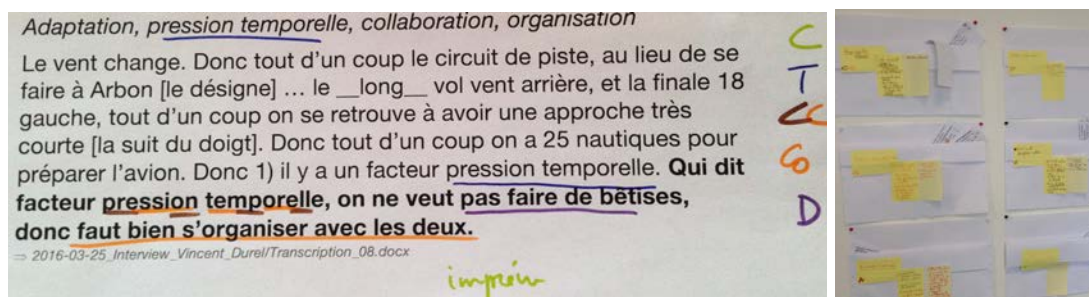


Figure 54. Citation extraite des observations codée par thèmes (à gauche) ; enveloppes permettant de classer les citations par thèmes (à droite).

Une sélection de 260 citations du corpus total a été codée par thèmes (ex. collaboration, gestes, contrôle) et sous-thèmes sur papier par soulignement en

utilisant un code couleur (Figure 54) puis insérées dans une base de données relationnelle (Figure 55). Cet outil d'analyse de données qualitatives, développé par nos soins (voir annexe 10.5), nous a permis de partager et de collaborer dans une phase importante de compréhension de l'activité. Le codage pouvait se faire sur la citation entière ou sur des mots particuliers ; un système de recherche par mot clé et de tri par catégorie nous ont permis de regrouper et de mettre en relation des données pour faire émerger des dimensions de l'activité récurrentes et pertinentes à adresser lors de nos séances de conception (Figure 55). De plus le choix de travailler sur des citations extraites des transcriptions facilement partageables lors des séances de conception participative a considérablement facilité l'inclusion des designers et des pilotes dans le processus d'aller-retour entre les besoins de l'activité et la proposition de solution.

Problème dans le balayage visuel : <u>les éléments tactiles prennent plus de temps dans le circuit</u> : J'ai intérêt à faire attention, voire prendre appui, bien regarder... Et <u>pendant tout ce temps-là je ne peux pas balayer.</u>	<u>Tactile, Temps,</u> <u>Spatial, Charge</u> <u>cognitive,</u>	<u>limites du tactile, perte de</u> <u>temps, chemins, spatialisation</u> <u>info, structure rythmique, rupture</u> <u>de rythme, tâche prenante,</u>
Vous <u>remontez</u> le long de l'over head jusqu'à arriver en butée sur l'interrupteur qui est là et ensuite vous déplacez légèrement sur la droite et vous appuyez sur ce bouton gardé par un détrompeur [actions sans les yeux].	<u>Spatial, Feedback,</u> <u>Rythme,</u>	<u>repérage spatial ,</u>
Vous savez on apprend aux pilotes de chasse, quand ils sont en dépressurisation avec le masque gelé, à <u>mémoriser la position des boutons.</u> Certains pilotes de ligne ont gardé ces <u>automatismes.</u> La manette de volets par exemple <u>on "voit" [en faisant un geste sans le regard] où est ce qu'elle est.</u>	<u>Feedback, Spatial,</u> <u>Gestes,</u>	<u>skill, toucher, perception/action</u> <u>multimodale, chemins, geste</u> <u>pour guider la perception,</u>
Au décollage le PF contrôle visuellement PFD/ ECAM/extérieur	<u>Spatial, Monitoring,</u>	<u>intérieur/extérieur,</u>
avec les yeux, ça suffira pas , parce qu'en fait <u>on touche</u> (<u>geste de toucher la console centrale</u>) quand on passe sur les manettes on vérifie qu' <u>elles sont bien là</u> et ici que c'est bien fermer que tous les interrupteurs que tous les boutons poussoirs <u>sont bien en place</u> et pareil ça va être <u>la haut (overhead)</u> on va toucher [scanning physique]	<u>Feedback, Gestes,</u> <u>Spatial, Formes,</u>	

Figure 55. Exemple de codage de citations dans l'outil d'analyse de données qualitatives

Conception

Cette phase a été initiée dès le début du travail de recherche et s'est poursuivie durant plus de 30 mois. Nous avons organisé 6 séances de conception participative avec les pilotes et plus de 15 séances avec l'équipe du projet Airtius composée de chercheurs en IHM et de designers. Ce travail a permis de générer 150 idées, 74 ont été illustrées par des dessins, 44 par des prototypes papier et vidéo. L'intégration de notre travail de recherche dans le projet ANR Airtius nous a permis de bénéficier de la collaboration de nombreux intervenants dans l'organisation et la participation aux différentes séances. Le travail présenté dans ce document n'est évidemment pas la synthèse de toutes les productions du projet global, cependant nous nous devons de présenter l'intégralité du processus qui a alimenté notre travail.

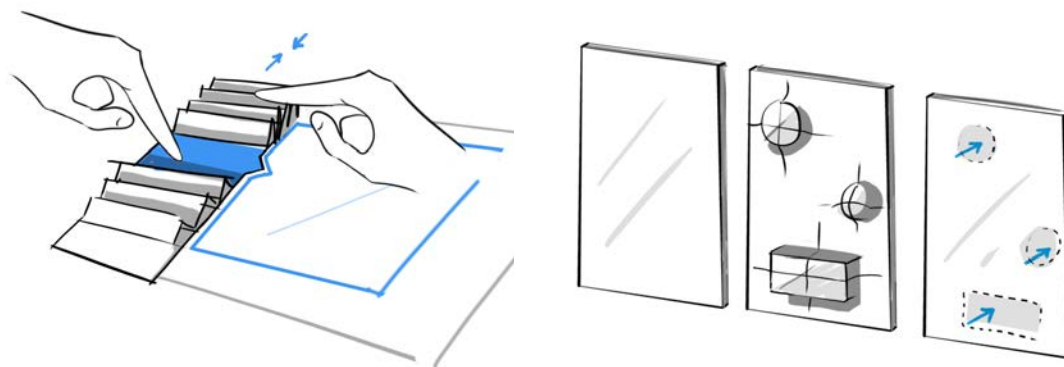


Figure 56. Exemples de dessins de conception ; concept *Multi-plié* (à gauche) ; boutons émergents (à droite), réalisation Claire Lavenir.

Les séances de conception menées avec la participation des pilotes se sont déroulées majoritairement sous forme de mini entretien introductif suivi d'un atelier de prototypage participatif papier des idées issues de la discussion initiale. Les séances de conception avec l'équipe Airtius (designers et chercheurs) se déroulaient plus sous forme de brainstorming post-it, de sélection d'idées et de prototypage papier et vidéo. L'illustration des idées par des dessins (Figure 56) en cours de séance ou a posteriori a favorisé le partage des résultats et facilité le questionnement de ces premières itérations dans les séances suivantes (Figure 57).



Figure 57. Mur d'idées, résultat d'une séance de conception

Walkthrough

Afin d'évaluer les résultats de notre travail de conception avec les pilotes nous avons organisé, en début de projet, 2 séances autour des prototypes cartons mis en scène dans des scénarios de conception et présentés sous forme de vidéos. Nous avons ensuite organisé des sessions d'évaluation et d'exploration avec les pilotes sur les 2 prototypes présentés dans la suite de ce document. Les séances de design walkthrough se déroulaient soit sous forme de discussion autour de la

présentation de prototypes vidéo (Figure 58) soit par la manipulation de prototypes fonctionnels par les pilotes et le recueil de leurs ressentis et remarques. Très souvent, des entretiens contextuels ont été menés de façon informelle au cours des séances, ce qui a permis de faire parler les pilotes sur une situation récente, déclenchée par un aspect exploré pendant la séance. Nous présenterons plus en détail l'organisation de ces séances dans les parties méthode des sections de présentation des 2 prototypes.



Figure 58. Séances d'évaluation ; a) Prototype vidéo de *GazeForm* présenté aux pilotes ; b) Enregistrement d'un prototype vidéo autour du concept *Multi-plié* sur le cockpit en carton

4.1.1 Des pilotes de l'aviation commerciale au centre du processus de conception

Nous avons au total collaboré avec 8 pilotes professionnels différents, les trois quarts d'entre eux ont participé à au moins 2 séances. 90% des séances ont été organisés avec un seul pilote afin d'éviter de potentielles autocensure causées par des conflit d'autorité. Les pilotes recrutés sont des commandants de bord ou des copilotes (Officier Pilote de Ligne) expérimentés, qualifiés sur Boeing B777, B737-800, Airbus A320 ou Beechcraft 1900D, et travaillant sur des compagnies aériennes telles que Air France, Transavia, Twin-Jet ou Volotea. L'un des participants est qualifié pour piloter l'Airbus A320 mais n'était pas en service au moment de l'étude.

4.1.2 Une exploration par prototypage et manipulation

Très rapidement dans le projet nous avons eu besoin de fabriquer des objets tangibles et de les manipuler ou de les faire manipuler pour affiner à la fois notre compréhension du besoin et appréhender les contraintes physiques des structures et des matériaux. Dans le cadre des sessions de type brainstorming, la fabrication des prototypes se faisaient, durant la séance, avec des matériaux de type papier, carton, pâte à modeler (Figure 59). Ces mêmes prototypes étaient conservés et pouvaient faire l'objet d'amélioration pour la réalisation d'un prototype vidéo ou la présentation à une séance d'évaluation avec les pilotes (Walkthrough). Les séances de conception étaient très souvent centrées sur les objets fabriqués ; positionnés au centre de la table ils étaient un support à la réflexion et permettaient de rebondir sur l'idée initiale de la première version

de l'objet. Comme si, confronter l'objet à notre propre corps nous permettait d'incarner la solution et de mieux comprendre le problème à adresser.

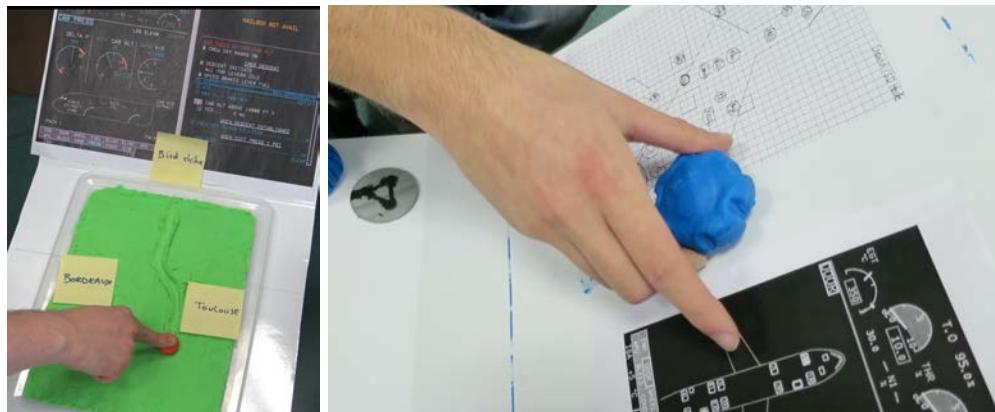


Figure 59. Exemples de prototypes réalisés en fin de séances de brainstorming

Certaines réalisations ont été menées jusqu'à des prototypes fonctionnels utilisés dans le cadre d'études qualitatives et quantitatives. Par exemple, pour le projet *Multi-plié*, nous sommes passés du dessin du concept au prototype fonctionnelle par plus de 15 versions de prototypes : des versions initiales papier, aux premières versions en cartons pliés et articulés réalisés en fin de séance de conception, aux productions plus poussées imprimées en 3D et rendu partiellement interactives avec l'intégration de composants électroniques (Figure 60). L'évolution a été continue avec peu de versions complètement abandonnées et des principes constructifs conservés entre les versions basse fidélité et haute-fidélité, comme par exemple la technique de fabrication de la surface souple tactile.



Figure 60. Évolution des maquettes du concept *Multi-plié*

4.1.3 Un atelier de fabrication

Pour répondre à un besoins fort de réalisation de prototypes manipulables nous avons installé et équipé un mini-atelier de fabrication dans les locaux du laboratoire de recherche de l'équipe d'Informatique Interactive de l'ENAC. L'équipement initial était composé d'une imprimante 3D Utltimaker 3 (Figure 61.a), de station de soudage et de petit matériel électronique (cartes, capteurs, câbles). Nous avons ensuite en fonction des premières réalisations et de la progression dans le processus de conception, intégré des outils d'usinage et d'assemblage ainsi qu'un système pour tester les actuations par air comprimé (Figure 61.b)

utilisé dans le cadre du projet *Multi-plié*. Ce lieu a permis de nourrir le processus de conception en favorisant la génération successive de mises en œuvre techniques et technologiques à tester, discuter et reconcevoir. Un processus par essai-erreur réflexif rendu possible par cette capacité de production internalisée accessible aux membres de l'équipe de conception. En plus de l'équipement de l'atelier, pour des besoins spécifiques, nous avons utilisé les systèmes de découpe laser des FabLab de l'Université Paul Sabatier et de l'INSA Toulouse. Cet écosystème de fabrication nous a permis d'accueillir et de collaborer efficacement avec une stagiaire en électronique (IUT Paul Sabatier), un stagiaire de l'ESTIA (École supérieure des technologies industrielles avancées) et trois stagiaires en mécatronique de l'ENSIL (École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Limoges) sur des durées de 2 à 6 mois.

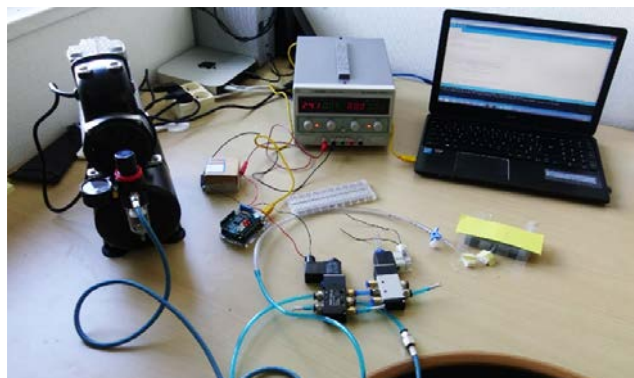


Figure 61. Atelier de fabrication ; a) Imprimante 3D Ultimaker ; b) Matériel pour montage électronique

4.1.4 Des plateformes de conception et d'évaluation

Le cockpit en carton

Dès le début de la phase de conception nous avons ressenti le besoin de pouvoir « projeter » nos idées dans un environnement physique reprenant la structure d'un cockpit. Nous avons donc initié la conception et la construction en carton d'une structure reprenant la disposition d'un cockpit classique avec 2 positions de pilotage et une surface continue se déployant en face et entre les 2 pilotes. Afin de garantir un environnement cohérent par rapport à notre contexte cible (cockpit d'avion de ligne) nous sommes partis des dimensions d'un cockpit d'A320 que nous avons adapté pour favoriser les interactions tactiles (inclinaison et rapprochement de la surface principale). Construit par assemblage de plaques de cartons découpées, le cockpit est facilement démontable et a pu ainsi être déplacé dans les différents lieux de réunion des séances de conception. La surface visible est recouverte d'un revêtement adhésif blanc effaçable permettant d'expérimenter en dessinant directement les éléments d'interface sur le dispositif (Figure 62.a). Ce support à la conception a été utilisé dans la majorité des séances que ce soit par les pilotes pour expliquer une situation vécue ou évaluer une idée ou par les concepteurs pour tester une hypothèse ou filmer la manipulation d'un prototype (Figure 62.b).

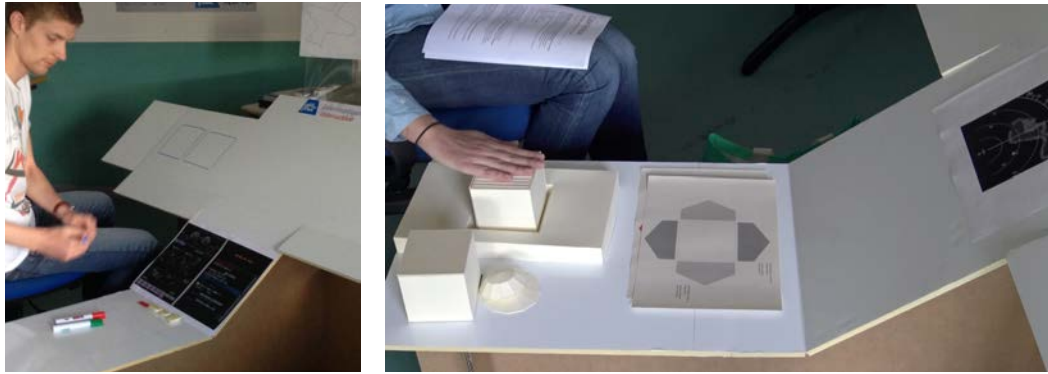


Figure 62. Le cockpit en carton utilisé comme support à la conception

Le cockpit en bois

La capacité d'expression du cockpit en carton ne suffisant plus à nos besoins nous avons décidé de concevoir et faire fabriquer une plateforme nous permettant de supporter les futures séances de conception et d'évaluation des prototypes fonctionnels en cours de fabrication. La structure bois, inspirée de la version carton, ainsi que le support des écrans et du vidéoprojecteur ont été fabriqués à partir de plans techniques réalisés avec le logiciel SketchUp, par les ateliers logistiques de l'ENAC (Figure 63.a). Les systèmes de fixation des écrans tactiles et du vidéoprojecteur permettent une grande souplesse de configuration de l'environnement. De plus, le choix du bois nous a permis de facilement modifier des parties par découpe ou fixation sans passer par l'atelier. Pour la partie tactile, nous avons choisi 5 écrans capacitifs multitouch Dell S2240T (22 pouces) que nous pouvons disposer librement le long d'un rail de fixation. Nous avons aussi prévu de pouvoir fixer sur le rail des plaques de bois recouverte d'un revêtement adhésif blanc effaçable pour pouvoir basculer entre différents niveaux de définition de prototype. Deux écrans incurvés LG 34UC79G (34 pouces) fixés face aux pilotes permettent d'afficher la vue extérieure d'un environnement de vol du logiciel de simulation Prepar3D de Lockheed Martin. L'utilisation du bus logiciel Ivy (projet libre LGPL, développé au CENA) nous permet de connecter facilement nos prototypes au système de simulation et ainsi de pouvoir faire évoluer la vue de l'environnement en fonction des actions des pilotes sur les prototypes ou sur les manettes de vol. Enfin pour pouvoir afficher des interfaces sur des surfaces d'interactions tactiles particulières nous avons monté un vidéoprojecteur courte focale Optoma DH-401 sur la structure en acier.



Figure 63. Le cockpit en bois ; en cours de fabrication (à gauche) ; en utilisation pour l'évaluation *Multiplié* (au centre) ; modèle 3D pour la fabrication avec (1) écrans courbes de 34 pouces, (2) projecteur, (3) zone d'intégration des prototypes (à droite).

Cette plateforme a été utilisée principalement lors des séances d'évaluation des prototypes *GazeForm* et *Multi-plié* (présentée dans les sections 5.4 et 6.5). La zone située sur la partie centrale du tableau bord, entre les pilotes, est aménagée pour accueillir les prototypes et proposer un environnement ergonomiquement propice à l'interaction tactile et tangible.

4.2 UN PROCESSUS INCREMENTAL AUTOUR D'UN ESPACE DE CONCEPTION « PERIMETRE »

Comme nous l'avons précisé précédemment, le processus de conception a été initié autour d'un espace de design défini en début de projet dans l'article de (Vinot et al., 2016) et implicitement partagé entre les membres de l'équipe de conception. Pour l'élaboration de ce premier espace de conception nous avons cherché à préciser les apports des interactions tangibles et incarnées (TEI) pour traiter les problèmes potentiels de sécurité aérienne posés par l'utilisation de surfaces tactiles dans les nouveaux cockpits de l'aviation commerciale. Ce premier travail a donné lieu à la définition d'un ensemble de principes de design, associé à des exigences, et regroupés dans des propriétés abstraites qui sont organisées selon trois axes (voir Figure 64). Le premier de ces axes, en magenta dans la Figure 64, regroupe les propriétés abstraites rattachées aux dimensions de la forme de l'interface « *Device Shape Properties* ». Dans cet ensemble, par exemple, la propriété abstraite *graspability* contient le principe de design *not too much focus* qui répond à l'exigence (RU4) *operational Performance*. Le deuxième axe, en bleu dans la figure, fait état des principes de design permettant de favoriser l'action et la perception incarnée « *Embodied Perception & Action* ». Enfin, le troisième axe, en jaune sur la Figure 64, liste les principes de design autour de la programmabilité de l'interface physique « *Programmability* », comme par exemple le principe d'adaptabilité de l'interface qui permet de répondre à l'exigence des industriels de réduction de coûts (RI1). Un premier travail qui nous a permis, d'une part de mieux comprendre les risques potentiels majeurs liés à la tactilisation des interfaces pilotes-systèmes et d'autre part de mieux appréhender les exigences de la gestion d'un système critique dans le contexte aéronautique.

Défini avant le travail d'analyse de l'activité fondée sur les observations (voir section 4.1.1), cet espace de conception a été utilisé comme un périmètre de possibles à explorer, délimité par un ensemble d'exigences extrait de la documentation (RTCA EUROCAE Joint Commitees, 2011), (Yeh et al., 2016) et des travaux antérieurs du laboratoire d'informatique interactive de l'ENAC (p. ex. (Letondal et al., 2014), (Vinot and Athenes, 2012)). Ce périmètre a été renforcé par le travail de (Castillo and Couture, 2016) sur la « tangibilisation des cockpits ».

C'est à partir de cette première itération de l'espace de conception, utilisée comme périmètre de travail lors des premières séances d'observation et de conception avec les pilotes, que nous avons commencé à structurer une version

spécifique pour les surfaces tactiles reconfigurables. Nous présentons, dans le chapitre 7, le déploiement d'un nouveau cadre de conception augmenté par notre travail d'analyse de l'activité et d'état de l'art ainsi que par les résultats des premières confrontations des prototypes avec les pilotes.

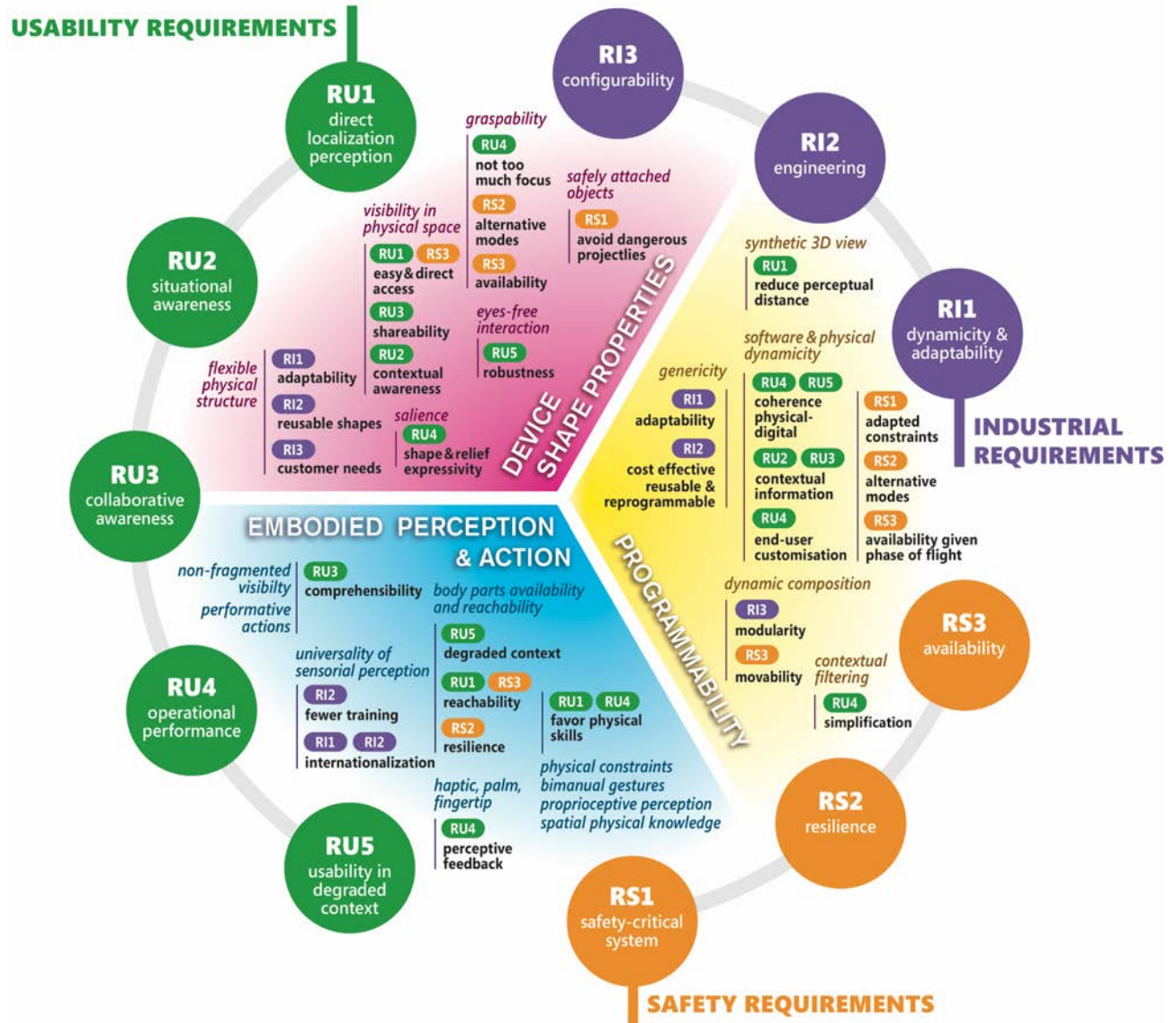


Figure 64. Espace de conception d'interaction tangible et incarnée pour le cockpit

4.3 CONCLUSION

La méthode de conception itérative et participative mise en place dans le cadre du projet Airtius a permis d'appréhender progressivement la complexité du contexte des activités cockpit des avions de ligne. La phase d'analyse de l'activité à partir d'observations in-situ de situations de pilotage et d'entretiens contextuels avec des pilotes en activité nous a permis de constituer un corpus de récits d'expériences utilisé à la fois pour la compréhension de notre problématique et pour la phase de génération d'idées. La phase de conception s'est articulée entre des

séances de brainstorming et de prototypage avec l'équipe de chercheurs en IHM et de designers du projet Airtius et les séances de design walkthrough avec les pilotes.

L'exploration par prototypage d'objets manipulables s'est avérée nécessaire pour affiner à la fois notre compréhension du besoin et appréhender les contraintes physiques des structures et des matériaux. Les 44 prototypes réalisés (dans le cadre du projet Airtius), de la version papier/carton fabriquée en fin de séance de brainstorming à la version semi-interactive améliorée par itérations, ont permis d'affiner nos systèmes constructifs, d'explorer nos questions de recherche à différents niveaux et d'affiner l'approche théorique de réincarnation de l'espace d'interaction tactile.

L'intégration du corps percevant et agissant dans notre processus de conception a été renforcée par la conception et la construction de plateformes reproduisant de façon « écologique » l'environnement physique d'un cockpit. Ainsi, autant les concepteurs que les pilotes pouvaient manipuler les prototypes produits, projeter des idées par le dessin ou encore s'immerger dans un récit d'expérience en s'installant dans un environnement pseudo-réaliste simplifié du cockpit.

Enfin, la définition d'un premier espace de conception d'interaction tangible et incarnée pour le cockpit nous a permis de définir un périmètre de travail autour d'un ensemble d'exigences (d'utilisabilité, de sécurité, industrielles) ; périmètre structurant pour le travail de conception et le déploiement d'un nouveau cadre de conception sur les interfaces tactiles reconfigurables (chapitre 7).

4.4 CONTRIBUTIONS

–Présentation du périmètre de conception défini par l'espace de conception pour les interfaces pilote-système publié à la conférence HCI-Aero 2016

5 GAZEFORM : FROM SURFACE TO SURFACE POUR « LIBERER » LE REGARD

The fundamental decomposition of the intelligent system is not into independent information processing units which must interface with each other via representations. Instead, the intelligent system is decomposed into independent and parallel activity producers which all interface directly to the world through perception and action
(Brooks, 1991)

Comme nous l'avons souligné précédemment dans l'étude sur les limites du tactile (section 2.5.1) et l'approche théorique sur le toucher pour l'interaction (section 3.1.3.1), l'interaction sur écran tactile sollicite fortement le canal visuel pour atteindre la zone d'interaction, interagir et visualiser le résultat de l'action. Face à cette contrainte de focalisation de l'attention visuelle nous avons cherché à concevoir une surface d'interaction tactile reconfigurable qui « libérerait » le regard pour favoriser la réalisation de tâches parallèles dans un environnement visuel complexe. Pour ce faire, nous avons conçu un dispositif qui « utilise le regard pour le libérer », ou plus précisément qui modifie la forme de la surface tactile en fonction de la position du regard pour permettre à l'utilisateur de continuer son interaction. Si celui-ci regarde la zone d'interaction la surface est plate et la modalité d'interaction est tactile (Figure 65), si le regard est sollicité par une autre tâche un bouton rotatif physique émerge de la surface pour permettre à l'utilisateur de continuer son interaction sans les yeux (Figure 65). Par cette première étude nous cherchons explorer le passage de la surface qui fait

écran (en bloquant le regard), à la surface qui implique un processus perceptif avec la participation d'un corps sentant et sensible.

Dans la suite de cette partie dédiée à l'étude *GazeForm*, nous rappelons succinctement des éléments de l'analyse de l'activité, du contexte et du champ théorique dans lequel nous nous insérons. Nous poursuivrons par une présentation du concept, des prototypes et de la méthode de l'expérimentation contrôlée et nous terminons par une présentation et une discussion des résultats.

Les résultats de cette étude sont repris dans le chapitre 7 pour caractériser les principes d'un espace de conception pour des interfaces tactiles reconfigurables.

5.1 LE CONCEPT GAZEFORM

GazeForm est une surface tactile reconfigurable offrant une modalité d'interaction adaptée en fonction de la direction du regard. Lorsque les yeux de l'utilisateur sont focalisés sur la zone d'interaction, la surface est plane et le système agit comme un écran tactile (Figure 65). Lorsque les yeux sont dirigés vers une autre zone, des boutons physiques émergent de la surface (Figure 65).

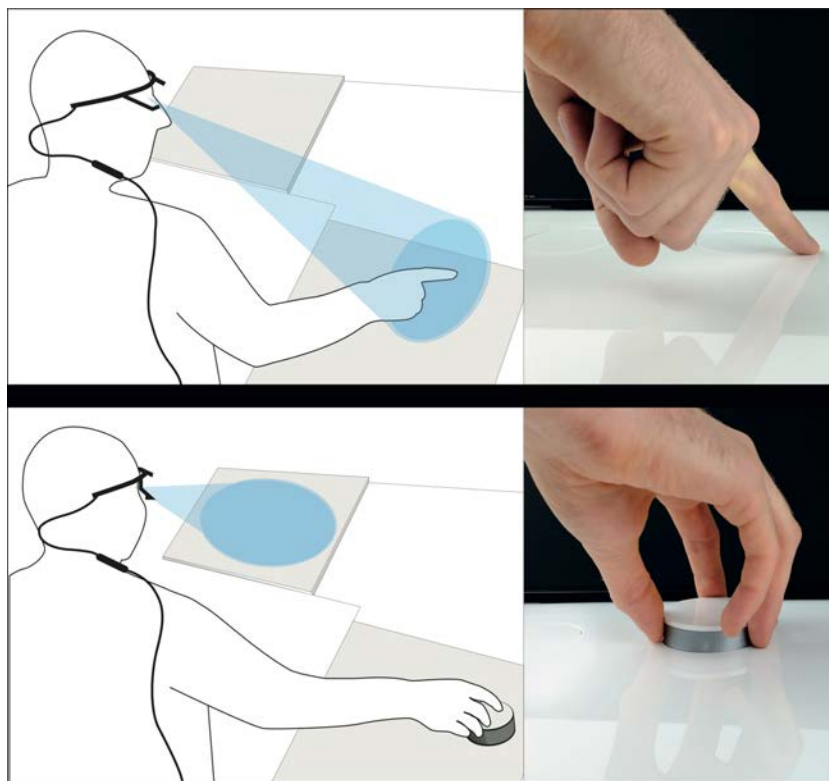


Figure 65. Concept *GazeForm* ; lorsqu'il existe une coordination œil-main pour la modalité tactile, la surface est plane (en haut); lorsque le regard est sollicité par une autre tâche, la surface offre un contrôle tangible saillant permettant une continuité de manipulation et libérant le regard (en bas).

5.2 CONTEXTE ET ETATS DE L'ART

Comme détaillé dans la section 2, l'intégration des écrans tactiles dans les cockpits de l'aviation commerciale soulève de nombreuses questions sur l'utilisa-

bilité et la robustesse de tels systèmes critiques en situations dégradées (turbulences, charge cognitive élevée, forte demande d'attention visuelle, etc.). Le concept d'une interface tactile s'adaptant aux contextes d'utilisation permet d'aborder en partie ce problème d'utilisabilité.

Interfaces adaptatives en fonction de l'activité oculaire

Les interfaces adaptatives en fonction du regard englobent les interfaces qui prennent en compte le regard de manière passive, implicite et indirecte (Jacob, 1993), (Salvucci and Anderson, 2000), (Göbel et al., 2016), (Qvarfordt, 2017). Un exemple de ce type d'interface serait Button+, un système qui prend en compte soit les informations situationnelles, soit les informations utilisateur en mode passif ou actif (Suh et al., 2017). (Oviatt and Cohen, 2000) décrivent cette approche comme un comportement multimodal naturel qui inclut un mode d'entrée passif utilisant une ou plusieurs modalités telles que la présence, la position du corps ou le regard, ou encore qui combine des modes d'entrée actifs et passifs. Les interfaces adaptatives à la position du regard comprennent également des systèmes qui utilisent l'information de l'activité oculaire pour améliorer l'interaction. (Salvucci and Anderson, 2000) propose d'utiliser facultativement le regard de l'utilisateur comme complément et de l'interpréter à l'aide d'un modèle tandis que (Serim et al., 2017) conçoivent des interactions, sur et à distance d'une surface tactile, augmentées par les informations du regard. (Göbel et al., 2016) soulignent l'intérêt d'adapter l'interface à l'attention visuelle de l'utilisateur à partir des données sur les mouvements oculaires associés aux processus cognitifs (fixation pour la lecture, saccades pour la recherche, etc.). Plus proche de notre travail, (Voelker et al., 2015b) améliorent les interactions sur un système à double écran (vertical et horizontal) en permettant de sélectionner et déplacer par le regard des éléments d'une surface à l'autre.

Les interfaces tangibles pour réduire la demande d'attention visuelle

Comme le souligne les deux études de Voelker et al. (Voelker et al., 2015a), (Voelker et al., 2015b), l'interaction tactile, par opposition aux contrôleurs physiques, exige l'utilisation du canal visuel pour contrôler l'action et atteindre un niveau de précision élevé. (Fitzmaurice et al., 1995), (Tory and Kincaid, 2013) et (Harrison and Hudson, 2009) démontrent que les fixations visuelles sont nécessaires lors de l'interaction tactile, par opposition aux systèmes physiques ou aux systèmes hybrides combinant le tactile et des guides physiques. Dans la continuité de ces études par l'utilisation d'un système d'oculométrie nous cherchons à explorer quantitativement ces différences de fixations et de mouvements oculaires entre une interface tactile et un système hybride (tactile et bouton physique).

Par ailleurs, (Jansen et al., 2012) et (Fitzmaurice and Buxton, 1997) ont montré que dans les situations de manipulation indirecte (zone de feedback séparée de la zone de contrôle), les objets tangibles sont plus performants que les écrans tactiles. Les résultats sont identiques si la zone de feedback est contiguë (Tory and Kincaid, 2013), (Harrison and Hudson, 2009). Ces travaux n'étudient pas les questions de continuité et de contrôle lors du passage de la manipulation

directe à la manipulation indirecte ; c'est une question que nous cherchons à aborder ici.

Interface reconfigurable

Notre travail s'inscrit dans le champ des interfaces à changement de forme présenté à la section 3.3.2. A la différence des études de (Iwata et al., 2001), (Hemmert et al., 2008), (Harrison and Hudson, 2009) sur les interfaces reconfigurables proposant une même modalité d'interaction nous nous inspirons plus des travaux de (Ramakers et al., 2014), (Robinson et al., 2016) qui proposent un changement de modalité d'entrée en fonction de la forme des systèmes. Ces études s'intéressent à la modalité en fonction de l'état de la forme et du dispositif et n'explorent pas le passage dynamique d'une modalité à l'autre, ce que nous souhaitons aborder avec notre concept.

5.3 RAPPEL DES QUESTIONS DE RECHERCHE ET DEFINITION DES HYPOTHESES DE L'ETUDE

Dans cette section, nous reprenons les 3 thèmes de recherche (Activité oculaire, Sensation et niveau de Contrôle, Continuité) définis dans l'introduction (chapitre 1) et enrichis par l'analyse de l'activité (section 2.5). Nous spécifions des questions particulières par rapport au contexte de l'étude puis nous précisons un ensemble d'hypothèses nous permettant d'explorer la pertinence du concept *GazeForm* en comparaison à une interface uniquement tactile.

Activité oculaire (Q1) : un premier ensemble de questions nous permet d'explorer les effets sur l'activité visuelle de l'utilisation d'une interface tactile reconfigurable par le regard. Premièrement, est-ce que l'interface tactile reconfigurable *GazeForm* réduit le nombre de mouvements oculaires entre certaines zones du poste de pilotage, à savoir la surface tactile et les écrans de surveillance des systèmes ? Deuxièmement, assure-t-elle une répartition efficace de l'attention entre les différentes tâches ? Troisièmement, favorise-t-elle la performance en termes de taux d'erreurs et de vitesse d'exécution ? Quatrièmement, ce concept permet-il de libérer l'attention visuelle de manière flexible en cas de besoin ? Enfin, réduit-elle les interruptions dans les circuits visuels de surveillance et favorise-t-elle la continuité de la surveillance suivant un rythme régulier, homogène et contrôlé, garant d'une exécution en toute sécurité ?

Sensation et niveau de contrôle pour un système critique (Q2) : une autre série de questions de recherche porte sur l'utilisation d'une surface tactile reconfigurable en fonction de la position du regard pour la gestion d'un système critique. En effet, l'exploration visuelle comprend des actions aussi bien automatiques que volontaires, le regard alterne entre des positions fixes (fixations) et des déplacements entre les différents objets d'attention (saccades). Par conséquent, nous devons évaluer l'acceptation d'un système utilisant le regard dans un contexte présentant déjà un environnement visuel complexe. D'autre part, nous évaluons le niveau de contrôle réel qui doit être laissé à l'utilisateur. Nous

évaluons s'ils se sentent maîtres de l'interface, par une latence appropriée de la détection de la direction du regard et du changement de forme qui en résulte et si le comportement du système ne leur semble pas incohérent. Nous vérifions également si le système améliore les performances (taux d'erreur faible, robustesse à l'interruption, temps d'exécution plus rapide) en comparaison à une interface tactile.

Continuité (Q3): enfin, nous devons nous demander si le concept *GazeForm* offre une interaction suffisamment fluide et continue malgré la reconfiguration de la surface tactile et le changement de modalité d'interaction. Nous évaluons si le passage de la surface plane tactile au bouton saisissable ne nuit pas trop à la continuité de manipulation. Nous souhaitons aussi explorer les différentes configurations de vitesse et de latence de transformation permettant de favoriser l'adaptation de l'action et garantir l'efficacité du système.

Afin d'explorer ces différentes questions, nous émettons l'hypothèse qu'une interface tactile reconfigurable en fonction de la position du regard améliorerait la collaboration homme-système dans un environnement critique temps réel. Pour cette étude, nous nous intéressons à la position du regard de l'opérateur mais d'autres aspects contextuels comme la turbulence ou le manque de visibilité pourraient être pris en considération pour déclencher le changement de forme de la surface tactile.

- *H1 : GazeForm réduit la charge de travail (pour explorer Q1)*
- *H2 : GazeForm réduit la demande d'attention visuelle et améliore la distribution de l'attention (pour explorer Q1)*
- *H3 : GazeForm favorise une plus grande efficacité dans la reprise de tâches (pour explorer Q2 et Q3)*
- *H4 : GazeForm n'affecte pas la continuité de la manipulation (pour explorer Q3)*

Nos questions de recherche et les hypothèses connexes ont été examinées au moyen d'une expérimentation contrôlée et complétée par des entretiens contextuels avec des pilotes.

5.4 CONCEPTION

Les premières idées de transformations de la surface pour faire apparaître ou masquer des boutons sont apparues tôt dans le processus de conception. Lors de la séance du 26/05/2016 avec les membres du consortium Airtius (10 participants dont 3 chercheurs en IHM, 2 designers et 1 ingénieur) plus de 5 idées sur les 30 retenues font état de la modification de la forme, de la taille des boutons et du changement d'état de la surface. Plus proche du concept *GazeForm*, une idée sur le masquage ou la mise en saillance de boutons en fonction de l'état du système et des choix de configuration de l'utilisateur a été proposée. Ou encore, l'idée de modifier par le système, la texture, la taille, la forme du bouton pour

inviter l'opérateur à effectuer des actions particulières. En plus de ces idées sur la forme, un participant a proposé d'utiliser la position du regard récupérée par un système d'oculométrie, pour afficher les alarmes en fonction de leur degré de criticité. Ces premières pistes de solutions ont été répertoriées en fin de séance dans un fichier partagé puis illustrées par un ou plusieurs dessins (Figure 67) qui ont été utilisés durant les séances de conception suivantes (Figure 57).

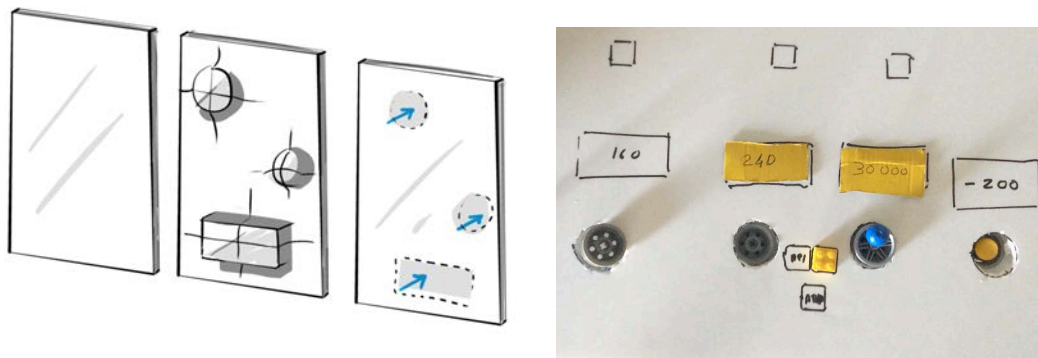


Figure 66. Dessin et prototype de l'idée de boutons émergeant ; dessin du principe de mise en saillance de boutons en fonction de l'état du système (à gauche) ; prototype carton utilisé pour la première évaluation avec un pilote (à droite)

L'idée de modifier le niveau de saillance d'un bouton par rapport à une surface a été améliorée et réalisée sous forme de prototype carton durant la séance du 28/09/2016 avec les membres du consortium Airtius (8 participants) (Figure 66). En s'inspirant du principe de *Dark cockpit* d'Airbus (toutes les lumières des boutons du cockpit sont éteintes en situation nominale) le degré d'émergence des boutons a été pensé pour représenter l'état du système par rapport à la phase de vol ; si tout va bien, la surface est plate ; si des actions sont requises alors les boutons sont sortis ; c'est en quelque sorte un « *Flat Cockpit* » (appellation utilisée par l'équipe de conception pour résumer le principe aux pilotes).

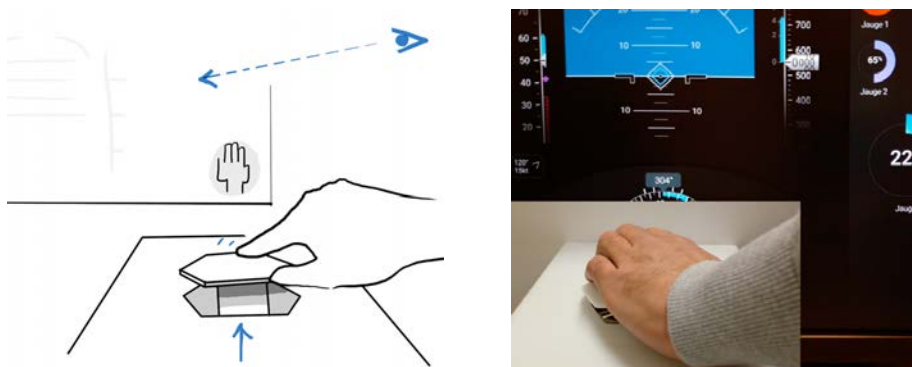


Figure 67. Prototypes du concept *GazeForm* ; Dessin du concept (à gauche) ; Prototype vidéo présenté à la séance de design Walkthrough (à droite)

Un prototype vidéo (Figure 67) a été ensuite présenté à un pilote (VD, Transavia – B737) lors d'une séance de conception participative (24/11/2016) introduite par un entretien autour de vidéos réalisées lors des séances précédentes. Pour le pilote, le concept de « *Flat Cockpit* » permet d'« effacer » un bouton pour ne pas agir

dessus par inadvertance (mode de Pilote Automatique non pertinent par rapport à la phase de vol, par exemple) ou encore est une solution pour indiquer les « actions possibles » sur le système. Ce concept a été jugé pertinent pour un contexte aéronautique, cependant une solution de contrôle pour faire émerger manuellement les boutons pour reprendre la main sur un « mode dégradé » devra être imaginée pour ne pas exclure le pilote du processus de contrôle. Les principes d'« Accessibilité » et de « Couplage » (couplage entre le geste physique et l'état de la forme) sont identifiés explicitement dans le concept de « Flat Cockpit ».

A partir des résultats des différentes séances nous avons décidé d'associer les idées de transformation de la surface et de contextualisation des alarmes en fonction de la position du regard (séance du 25/06/2016). Ce choix a été guidé par les remarques des pilotes lors des séances d'observation sur la forte sollicitation de l'attention visuelle pour les tâches de surveillance des systèmes. Nous avons donc cherché à utiliser la position du regard pour adapter l'interface et favoriser l'interaction sans les yeux. Ce principe a donné lieu à deux séries de prototypes vidéo. Dans la première série la position du regard est utilisée comme contexte et dans la deuxième comme moyen de sélection. C'est en tout six miniprototypes vidéo, réalisés avec une version simple du système d'émergence des boutons, qui ont été présentés à un pilote (OL, Air France – A320 et B737) pour évaluer la pertinence du concept et des scénarios de conception. Ce travail a permis de confirmer le principe d'utilisation du regard pour reconfigurer la surface d'interaction tactile et d'adapter nos scénarios en intégrant une situation de réglage de cap successif pour éviter une cellule orageuse. Ce scénario validé a ensuite été utilisé pour définir les tâches de l'expérimentation présentées dans la section (5.6.2).

5.5 PRESENTATION DE LA PLATE-FORME GAZEFORM

La plate-forme *GazeForm* est composée d'un écran tactile Dell 2240T situé devant l'opérateur (Figure 68.1) et d'une surface tactile reconfigurable (comportant 3 boutons rotatifs émergents) située sur la partie inférieure de la planche de bord centrale du poste de pilotage (Figure 68.2).

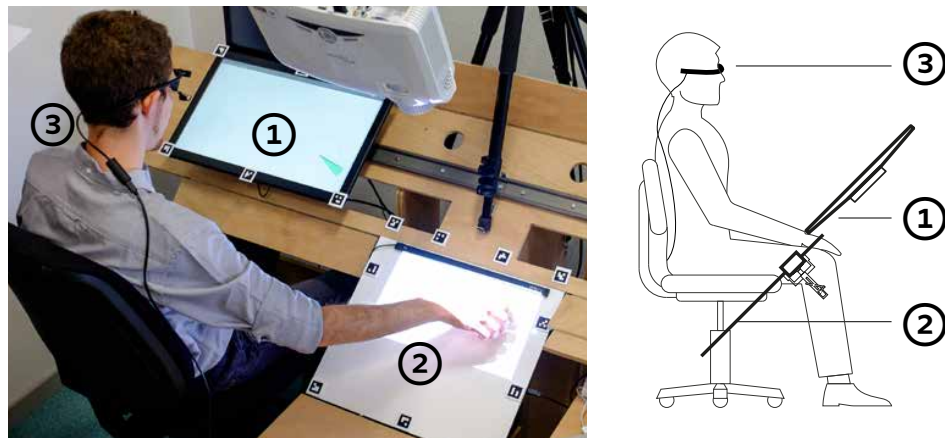


Figure 68. Plate-forme *GazeForm* avec écran tactile frontal (1), surface transformable inférieure (2) et système d'oculométrie (3).

Un système de suivi oculaire (Figure 68.3) récupère en temps réel la position du regard de l'opérateur. Les différents éléments sont intégrés dans une plate-forme de conception et de tests reproduisant de manière très simplifiée un tableau de bord de cockpit d'avion de ligne.

Deux dispositifs d'entrée pour la partie centrale inférieure

Afin d'effectuer une comparaison réaliste entre une surface uniquement tactile et une surface tactile transformable à boutons émergents, nous avons choisi d'utiliser deux dispositifs d'entrée différents sur la partie inférieure de la planche de bord centrale (Figure 68.2). Pour la surface uniquement tactile nous utilisons une simple plaque de PMMA (Polyméthacrylate de méthyle) tactilisée, alors que pour la surface tactile reconfigurable, nous avons découpé au laser une plaque de PMMA pour permettre l'intégration des 3 boutons émergents (Figure 69.3). Ces boutons se déplacent sur un axe vertical avec des servomoteurs reliés à une carte Arduino®. En position basse, toute la surface est plane, homogène et la fonction tactile est activée, en position haute, la partie émergente devient un bouton rotatif et la fonction tactile est désactivée. Les dimensions (35 cm x 45 cm) et la disposition de la surface sont déterminées pour faciliter l'intégration avec la plate-forme d'essai et permettre une interaction tactile avec une fatigue posturale minimale (Bachynskyi et al., 2015), (Barbé et al., 2012).

Pour les deux dispositifs, la zone est tactilisée avec le système infrarouge Airbar® positionné sur la partie supérieure de la surface (Figure 69.1). Bien que l'Airbar soit un système multi-touch, nous utilisons uniquement des interactions avec un seul point de contact tactile simultané. La projection sur la surface est assurée par un vidéoprojecteur Optoma HD20 FullHD fixé sur une structure positionnée au-dessus de la surface.

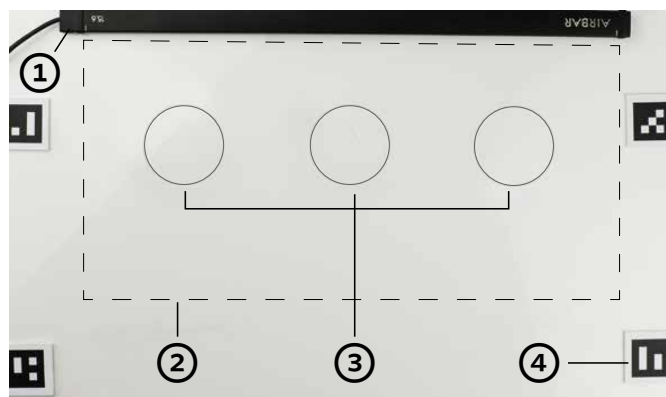


Figure 69. La surface inférieure : (1) Système Airbar®, (2) Zone d'affichage et d'interaction, (3) Boutons rotatifs rentrés, (4) Tags pour le système d'oculométrie

Les boutons rotatifs émergents

Sur la surface tactile reconfigurable, les trois cylindres de 55 mm de diamètre ont été découpés au laser. Le nombre et la disposition des boutons ont été définis pour atténuer l'effet de la mémoire spatiale sur les différentes tâches. Le déplacement linéaire est assuré par des servomoteurs Turnigy™ GTY-R5180MG

couplés à un mécanisme bielle-manivelle garantissant des déplacements sur un seul axe avec un contrôle précis de la vitesse et de l'accélération. Tous les éléments de structure et de fixation du mécanisme de déplacement ont été imprimés en 3D (PLA) et fixés à la surface acrylique par collage (Figure 70). Le mécanisme de transmission est conçu pour minimiser les frottements et assurer une émergence linéaire du bouton rotatif. Le diamètre du cylindre (55mm), la vitesse d'émergence des boutons (20mm/s) et la hauteur de l'émergence (25mm) ont été définis après plusieurs tests utilisateurs pour assurer une manipulation optimale.

Le bouton rotatif (Figure 70.5) est composé d'une base imprimée en 3D permettant l'intégration d'un potentiomètre Keyes KY-040. Une partie supérieure, également imprimée en 3D, est fixée sur le potentiomètre et permet la manipulation en rotation lorsque le bouton est relevé. Nous avons choisi le potentiomètre KY-040 pour son mouvement sans butée au-delà de 360°. Ce modèle possède 30 encoches physiques de 12° chacune ; le sens de rotation, le nombre de pas et la pression sur le bouton sont convertis en signaux analogiques.

Les trois servomoteurs sont commandés par une carte Arduino® Uno tandis que les données des potentiomètres sont récupérées sur une deuxième carte du même type. Ces 2 cartes sont reliées en USB à une unité centrale (PC) exécutant l'application pilotant d'expérimentation.

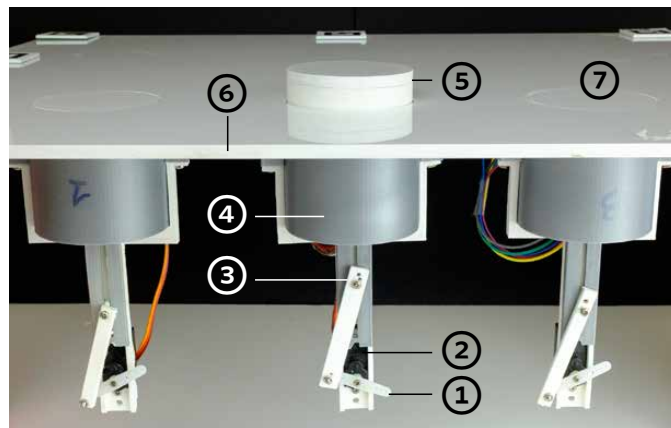


Figure 70. Système d'actuation des boutons rotatifs : (1) manivelle, (2) servomoteur, (3) bielle, (4) guide de déplacement linéaire, (5) bouton rotatif sorti, (6) surface, (7) bouton rotatif rentré

Le système d'oculométrie

Le système de suivi oculaire porté par les opérateurs a deux rôles : déclencher l'émergence des boutons en fonction de la position du regard et recueillir les données de déplacement oculaire pour l'analyse à posteriori. Nous avons choisi le dispositif Pupil-labs® qui permet d'identifier en temps réel (7,5ms de latence) la surface regardée par une reconnaissance optique de marqueurs 2D (ArUCO). Le logiciel open source Pupil Capture est utilisé pour calibrer les lunettes, enregistrer dans un fichier de logs et publier sur un port UDP les données d'oculométrie. Ces données sont ensuite publiées en temps réel sur le bus logiciel Ivy pour être partagées facilement par les différents composants logiciels de la

plate-forme. Après l'étalonnage, la précision du regard était d'environ 1,2 degré et la détection de la surface observée était fiable à 98 %. Afin d'éviter les effets de clignotement et d'oscillation du système, nous avons fait le choix de valider la sortie du regard d'une zone uniquement si celui-ci est détecté dans la zone contiguë.

Architecture logicielle

L'application principale de la plate-forme de test remplit plusieurs rôles : la gestion des utilisateurs, la récupération des données à partir de diverses entrées (valeurs du potentiomètre de la carte Arduino, coordonnées de suivi des yeux, durée des mouvements visuels entre les zones) et la gestion de l'interface utilisateur graphique et tangible (écran et affichage vidéo projecteur, émergence des boutons). Cette application développée en Java est basée sur le framework djnn (Magnaudet et al., 2018), un framework de développement de logiciels libres pour des interfaces utilisateurs hautement interactives et visuelles, basées sur une programmation réactive.

5.6 PRESENTATION DE L'EXPERIMENTATION CONTROLEE

Nous avons mené une expérience contrôlée pour comparer le concept d'une surface à changement de forme basé sur le regard à une surface tactile plane et statique. De la même façon que pour le processus de conception de la plate-forme, nous avons utilisé les questions de recherche (Q1, Q2, Q3) et les hypothèses (H1, H2, H3 et H4) pour définir notre protocole expérimental. Ce protocole a été construit autour d'un scénario de conception impliquant l'utilisation de la nouvelle interface *GazeForm* dans un contexte de cockpit de l'aviation commerciale.

Scénario de conception

Dans son nouveau cockpit tactile, pour éviter une cellule orageuse, le PF (Pilot Flying) commence le réglage de changement de cap sur l'écran central inférieur en mode tactile. Comme le pilote réglementairement porter son regard vers le PFD (Primary Flight Display), situé devant lui, pour vérifier que le nouveau paramètre est pris en compte par le système, l'écran central inférieur tactile se transforme en un bouton rotatif physique, permettant au PF de continuer [H4 - continuité de la manipulation] les réglages sans regarder la zone de contrôle [H2 - attention visuelle requise]. Pour vérifier la configuration de la poussée des moteurs, le pilote relâche le bouton rotatif pendant quelques secondes, place sa main sur la manette des gaz et revient ensuite au réglage de cap. Le bouton rotatif "tombe dans la main" et le PF peut rester concentré sur la surveillance du PFD [H3 - reprise de la tâche]. Un trafic dense et des conditions météorologiques dégradées obligent l'équipage à se concentrer particulièrement sur la trajectoire de vol tout en surveillant les systèmes et en regardant à l'extérieur de l'avion. Le PF doit faire les derniers réglages de cap : il stabilise sa main sur le bouton, sent les encoches de la rotation et effectue un réglage précis tout en surveillant sa trajectoire de vol et en confirmant l'action avec le PM [H1 - charge de travail]. La

cellule orageuse est maintenant évitée, le PF a relâché le bouton, celui-ci se rétracte et la surface tactile peut maintenant être utilisée par le pilote pour interagir pleinement sur l'écran central inférieur avec les données du plan de vol.

Inspirés par le scénario, nous avons conçu trois tâches « représentatives » : une tâche de réglage, une tâche de surveillance et une tâche de confirmation par action tactile. Ces différentes tâches sont à réaliser à l'aide des deux différents dispositifs d'entrées : surface uniquement tactile (Tactile) ou surface tactile avec boutons émergeants en fonction de la position du regard (*GazeForm*).

5.6.1 Méthode

Nous avons utilisé trois variables indépendantes :

- 2 dispositifs d'entrée : surface uniquement tactile (Tactile) ou surface tactile avec boutons émergeants en fonction de la position du regard (*GazeForm*),
- 3 difficultés de réglage : facile (taille de la cible : 40°, distance à la cible 60°), moyenne (taille de la cible : 20°, distance à la cible 100°), difficile (taille de la cible : 10°, distance à la cible 150°),
- 2 difficultés de sous-tâche de surveillance : facile (3 stimuli), difficile (6 stimuli)

La variation des variables indépendantes a été organisée en 12 blocs expérimentaux. Les tests étaient composés d'une tâche principale (une série de réglages) et de deux tâches secondaires (surveillance et *slider*). Ainsi, chaque participant devait effectuer 12 blocs (6 en entrée Tactile et 6 avec le dispositif *GazeForm*) composés chacun de 19 tâches de réglage, 1 sous-tâche de validation et 3 ou 6 sous-tâches de surveillance. Concernant la condition du dispositif d'entrée, et pour éviter un biais expérimental, nous avons utilisé la méthode du *contre-balancement* : la moitié des participants ont commencé avec l'entrée *GazeForm* et l'autre moitié avec l'entrée Tactile.

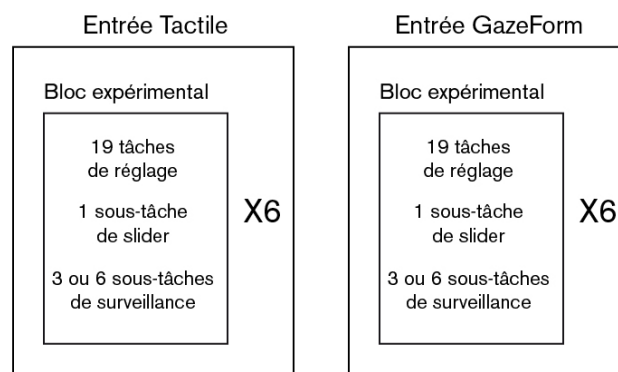


Figure 71. Composition des blocs de tests

5.6.2 Les tâches

La tâche principale de réglage (déplacement d'une aiguille dans une zone cible) s'inspire d'études antérieures telles que Knobology (Voelker et al., 2015b)

ou Turbulent Touch (Cockburn et al., 2017). La tâche de réglage consiste à sélectionner une aiguille (Figure 72.3a) par un « tap » effectué sur l'écran central inférieur (Figure 72.1) et à la déplacer cette aiguille vers une zone cible verte. La tâche est validée lorsque l'aiguille est maintenue plus de 500ms dans la zone cible. La tâche suivante est alors déclenchée avec l'affichage d'une nouvelle zone cible à atteindre. Des pré-tests du protocole ont montré que la sélection de l'aiguille est plus difficile en mode tactile qu'avec un bouton physique, nous avons donc augmenté la zone de sélection (en rose dans la Figure 72.3a), pour compenser ce problème (*Semantic pointing* (Blanch et al., 2004)). Avec la modalité d'entrée *GazeForm*, le déplacement de l'aiguille est possible soit en tactile (comme pour la modalité uniquement tactile) ou soit à l'aide du bouton rotatif quand il est en position émergée. Dans ce cas, la précision de réglage est de 12° et correspondant au pas physique du potentiomètre. La dimension minimum de la cible a donc été définie en fonction de cette contrainte physique.

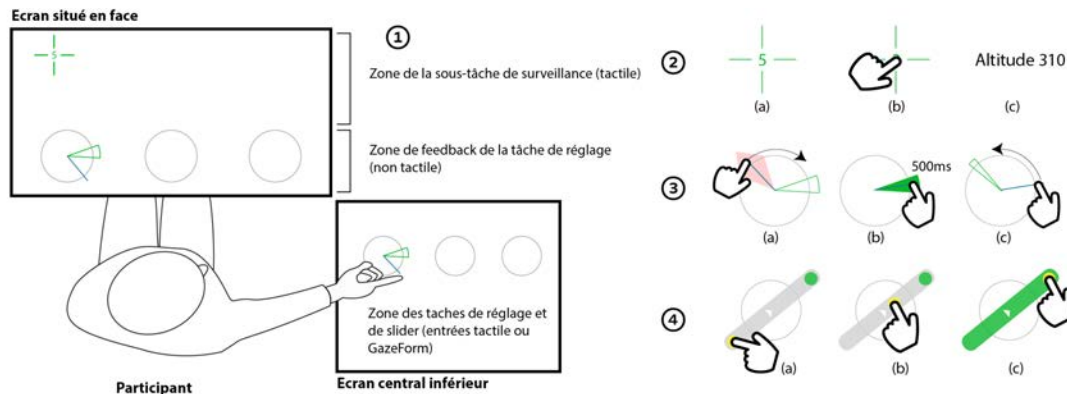


Figure 72. Détails des tâches et sous-tâches : (1) Position du participant et disposition des zones d'interaction. (2) Étapes de la tâche de pointage (3) Étapes de la tâche de réglage (4) Étapes de la tâche de slider.

La sous-tâche du geste tactile continu (slider) sur l'écran central inférieur oblige le participant, quand il est en modalité *GazeForm* avec les boutons émergés, à re-passer en mode surface tactile avec les boutons abaissés. Cette sous-tâche est une simplification d'une tâche tactile réaliste plus complexe, comme la modification d'un plan de vol sur une carte par le déplacement d'un élément d'interface par glissé sur une zone d'interaction qui occuperait toute la surface. La raison d'être de cette tâche est d'évaluer la capacité de l'interface à revenir à une surface homogène et lisse permettant une interaction tactile avec un geste continu. Cette tâche se déroule de la façon suivante : 1. sélectionner le cercle jaune par un tap (Figure 72.4a), 2. déplacer le cercle jaune par une geste de glissé sur la surface (Figure 72.4b) et 3. valider la tâche en positionnant le cercle jaune dans le cercle vert (Figure 72.4c).

La sous-tâche de surveillance sur l'écran situé face au participant reproduit une situation de tâches simultanées très fréquente dans l'activité de pilotage. En obligeant le participant à effectuer des mouvements oculaires pour surveiller plusieurs écrans nous souhaitons reproduire la contrainte de la surveillance des paramètres de vol sur le Primary Flight Display (PFD) que le pilote doit réglementairement effectuer tout au long d'un vol. La sous-tâche de surveillance

consiste à valider une cible par un « tap » sur une croix affichée sur l'écran de devant (Figure 72.2a), et à lire à haute voix le texte (paramètre de vol) qui est ensuite affiché à la place de cette cible (Figure 72.2c). Si le participant ne tape pas sur la cible dans les 5 secondes, la croix disparaît et la sous-tâche est enregistrée comme ayant échoué. Le but de cette sous-tâche, qui interrompt la tâche principale de réglage, est d'explorer les hypothèses sur la reprise des tâches (H3) et la distribution de l'attention visuelle sur plusieurs écrans (H2).

5.6.3 La procédure

Nous avons recruté 24 participants adultes de notre université aéronautique (14 membres du personnel et 8 étudiants). Trois participants étaient gauchers mais utilisaient la souris avec la main droite. 12 appartenaient au groupe d'âge 18-29 ans, 6 au groupe 30-39 ans, 2 au groupe 40-49 ans, 3 au groupe 50-59 ans et 1 au groupe 60-69 ans. Douze ont indiqué une vision normale et 12 une myopie mineure, un astigmatisme ou une presbytie légère, mais tous ont été capables d'effectuer l'expérience sans lunettes. Dix-neuf participants se sont déclarés experts dans l'utilisation des écrans tactiles, un s'est déclaré débutant et quatre ont déclaré une expertise moyenne.

Les participants ont été accueillis par une présentation rapide de l'expérimentation, de la plate-forme et du but de l'étude. Une séance de formation au dispositif permettait à l'expérimentateur d'expliquer la technique pendant que les participants s'exerçaient sur la plateforme avec la modalité uniquement tactile et avec la modalité *GazeForm* jusqu'à ce qu'ils se sentent à l'aise. La passation de l'expérimentation débutait après cette phase initiale : 2 blocs de réglages principaux à réaliser en fonction de la modalité d'entrée (tactile ou *GazeForm*), la moitié des participants commençant par la modalité tactile, l'autre moitié commençant par la modalité *GazeForm*. Les blocs de tests étaient censés s'enchaîner sans interruption, toutefois, un peu de repos était permis pour les participants qui en faisaient la demande. Après chaque modalité d'entrée (tactile ou *GazeForm*), les participants devaient remplir les questionnaires NASA-TLX (mesure subjective de la charge mentale et performance) et SUS (questionnaire standardisé d'évaluation de l'utilisabilité) (annexe 10.6). En fin d'expérimentation, ils répondaient à un dernier questionnaire visant à évaluer le concept *GazeForm* de modification de la forme de l'interface et de la modalité d'interaction en fonction de la position du regard. Ils ont été invités à échanger librement à ce sujet et à remplir une zone de texte avec des commentaires concernant l'utilisation du système et les éventuelles lacunes ou améliorations.

5.6.4 Les données enregistrées pendant l'expérimentation

Les données objectives de performance.

Pour la tâche principale de réglage : *temps de positionnement de l'aiguille dans la cible, dépassement de cible.*

Pour la sous-tâche de surveillance : *temps entre l'affichage de la croix et le tap de validation, nombre de croix sans tap de validation, nombre d'erreurs de*

lecture à haute voix du texte, temps pour reprendre la tâche principale de réglage après le tap de validation sur la croix.

Pour la sous-tâche slider : *temps pour réaliser le slider.*

Les données oculométriques.

Le pourcentage de temps passé à regarder les différentes surfaces (écran de devant et surface d'interaction centrale basse) et le nombre de transitions entre les deux surfaces.

Les données subjectives

Questionnaires SUS et NASA-TLX (Hart and Staveland, 1988) pour chaque modalité d'entrée.

Commentaires libres écrits. Les participants ont été invités à remplir un champ de commentaires d'une page décrivant leur expérience de l'interaction ou à suggérer des améliorations.

Les séances d'expérimentation ont été filmées, nous avons ainsi pu transcrire les commentaires oraux des participants pour les analyser.

5.6.5 Entretiens avec les pilotes

En plus de l'expérience contrôlée, nous avons mené une série d'entretiens avec 5 pilotes (dont 4 pilotes de ligne expérimentés), au cours de quatre sessions de 2 à 3 heures, qui ont été filmées et partiellement transcrites. Nous avons demandé aux pilotes d'effectuer une version réduite du protocole (3 essais au lieu de 6 pour chaque condition d'entrée). Nous leur avons également permis d'explorer certaines variantes du système qui n'avaient pas été présentées aux participants de la première expérience, et ils ont été invités à les commenter au cours de la manipulation. Ces variantes étaient accessibles par une interface de configuration permettant de régler : le délai avant émergence / rétraction ; la vitesse d'émergence / rétraction ; et les modes, entièrement manuel, mixte, ou entièrement automatique (Figure 73).

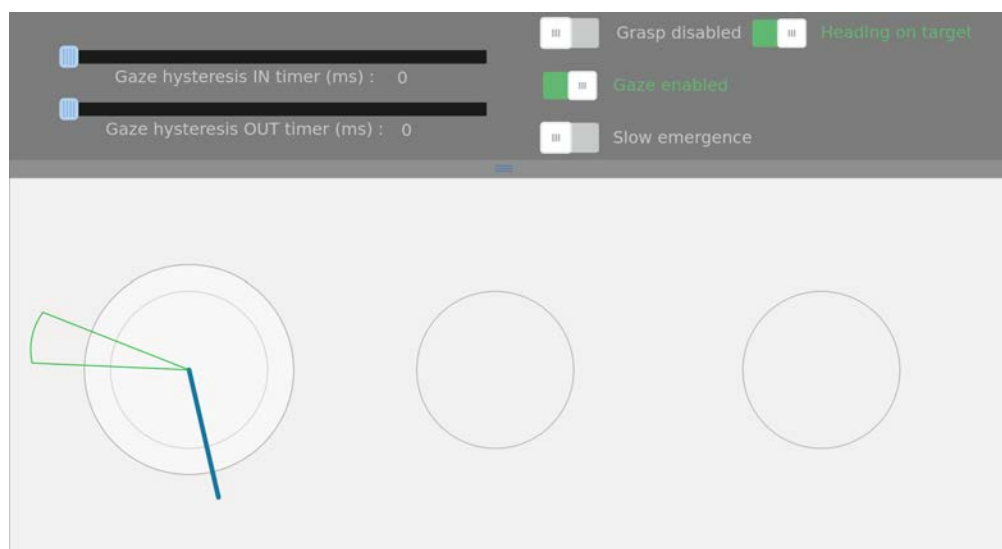


Figure 73. Interface de configuration permettant de régler : le délai avant émergence / rétraction ; la vitesse d'émergence / rétraction ; et les modes, entièrement manuel, mixte, ou entièrement automatique.

5.6.6 Analyse statistique

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide de Statistica 10 (StatSoft®) et la signification a été définie à $\alpha = 0,05$. Pour le NASA-TLX, nous avons utilisé la méthode d'analyse Raw Task Load Index (RTLX)](Hart, 2006).

L'analyse des cotes subjectives des 6 sous-échelles NASA-RTLX a été effectuée à l'aide de six analyses différentes de variance des mesures répétées à sens unique. Les variations du score SUS ont également été étudiées à l'aide d'une mesure répétée à sens unique ANOVA. Enfin, les données sur la performance comportementale et le suivi oculaire ont été examinées à l'aide d'ANOVA à trois voies ($2 \text{ entrées} \times 3 \text{ difficultés d'exécution} \times 2 \text{ difficultés de suivi}$) à mesures répétées pour déterminer les effets de l'entrée (*GazeForm* ou Tactile), de la difficulté de réglage et de la difficulté de la tâche de surveillance sur les variables dépendantes.

5.7 RESULTATS

5.7.1 Les données subjectives

NASA-RTLX

L'analyse des évaluations subjectives de chaque dimension de la charge de travail a révélé que l'entrée *GazeForm* a généré une charge de travail perçue nettement inférieure à celle de la modalité Tactile. Les six analyses de variance à une voie répétées étaient significatives pour les six sous-échelles NASA-RTLX : L'entrée *GazeForm* a généré des exigences mentales / physiques / temporelles perçues plus faibles ($F(1, 23) = 23.50, p < 0.001, \eta^2p = .51$; $F(1, 23) = 12.64, p = 0.001, \eta^2p = .35$; $F(1, 23) = 21.46, p < 0.001, \eta^2p = .48$, respectivement), une performance perçue plus élevée ($F(1, 23) = 10,44, p = 0,003, \eta^2p = 0,31$) et un effort et une frustration perçus plus faibles ($F(1, 23) = 29,37, p < 0,001, \eta^2p = .56$; ($F(1, 23) = 28,87, p < 0,001, \eta^2p = .56$) respectivement) voir Figure 74.

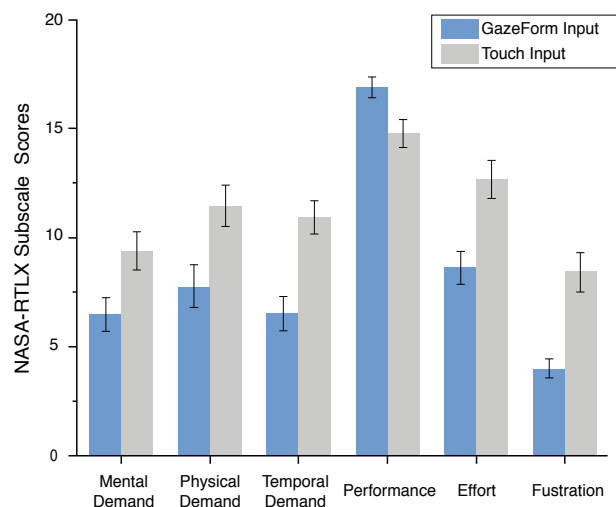


Figure 74 - Moyenne des six scores des sous-échelles NASA-RTLX pour l'entrée *GazeForm* et l'entrée Tactile. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.

Utilisabilité : System Usability Scale

Les notes SUS étaient également en faveur de l'entrée *GazeForm*, comme le démontre la mesure répétée à sens unique ANOVA ($F(1, 23) = 29,37$, $p < 0,001$, $\eta^2p = .56$). La figure 7 montre les scores SUS moyens pour les deux modalités, plus les valeurs sont élevées, plus l'utilisabilité perçue est élevée.

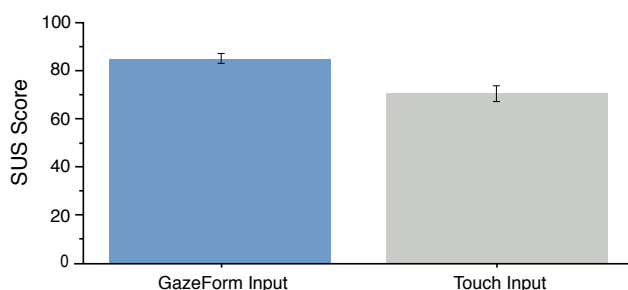


Figure 75. Score SUS moyen pour l'entrée *GazeForm* et l'entrée Tactile. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.

5.7.2 Les données objectives de performance

Temps d'exécution

Il est important de noter que la modalité d'entrée (*GazeForm* ou Tactile) a eu un effet principal sur le temps de réalisation de la tâche de réglage, avec un temps d'exécution plus court avec l'entrée *GazeForm* comparé à l'entrée Tactile Input ($F(1, 23) = 60.37$, $p < 0.001$, $\eta^2p = .72$). Nous avons également constaté un effet de la difficulté de la tâche de réglage ($F(1, 23) = 65.60$, $p < 0.001$, $\eta^2p = .74$), avec une augmentation continue du temps d'exécution en fonction des trois niveaux de difficultés ($p < 0.001$ dans toutes les comparaisons), et un effet principal de la difficulté de surveillance, également avec une augmentation du temps d'exécution lorsque la sous-tâche de surveillance est plus complexe ($F(1, 23) = 18.50$, $p < 0.001$, $\eta^2p = .45$). Il est intéressant de noter qu'il y avait également une interaction modalité d'entrée $\times$ difficulté de la tâche de surveillance significative ($F(1, 23) = 15,09$, $p < 0,001$, $\eta^2p = 0,40$), montrant que l'entrée *GazeForm* était moins affectée par la difficulté de la tâche de surveillance (Figure 76).

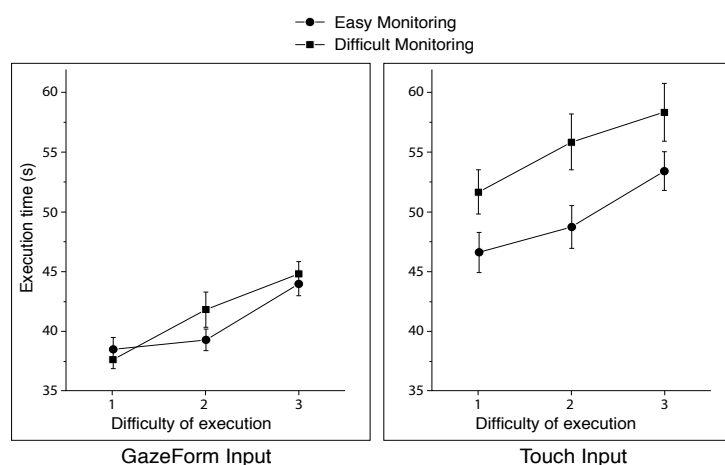


Figure 76. Temps d'exécution moyens de la tâche de réglage en entrée *GazeForm* et Tactile sur les 3 niveaux de difficulté de réglage et les 2 niveaux de difficultés de surveillances. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.

Comme analyse complémentaire, nous avons examiné si l'âge et l'expérience dans l'utilisation des écrans tactiles modulent le temps d'exécution avec les deux modalités d'entrée. Les corrélations Bravais-Pearson ont révélé une corrélation positive significative entre l'âge et le temps d'exécution moyen (indépendamment des niveaux de difficulté des tâches de réglage et de surveillance) pour les 2 modalités d'entrée (*GazeForm* et Tactile) ($r = 0,50$, $p = 0,012$; $r = 0,58$, $p = 0,002$, respectivement). De plus, le niveau d'expérience dans l'utilisation d'écran tactile était corrélé négativement avec le temps d'exécution pour la modalité d'entrée Tactile ($r = -0,42$, $p = 0,038$) mais pas avec la modalité *GazeForm* ($p > 0,05$).

En ce qui concerne le temps d'exécution spécifique à la tâche de Slider, nous avons constaté que *GazeForm* était moins performant que la modalité Tactile ($F(1, 23) = 19.31$, $p < 0.001$, $\eta^2p = .46$) avec une augmentation de +24.41% du temps d'exécution.

Temps de réaction à la tâche de surveillance

Encore une fois, nous avons trouvé un effet significatif de la modalité sur le temps de réaction à la sous-tâche de surveillance, avec un temps de réaction plus court (environ 8 %) avec l'entrée *GazeForm* qu'avec l'entrée Tactile ($F(1, 23) = 22,48$, $p < 0,001$, $\eta^2p = .49$). Nous avons également constaté un effet significatif de la difficulté de la tâche de réglage ($F(1, 23) = 8.10$, $p < 0.001$, $\eta^2p = .26$), avec un temps de réaction plus long en difficulté 3 par rapport à la difficulté 1 ($p < 0.001$ et $p = 0.022$ respectivement). Ainsi qu'un effet significatif de la difficulté de la sous-tâche de surveillance, avec une augmentation des temps de réaction lorsque la sous-tâche de surveillance est plus complexe ($F(1, 23) = 18.50$, $p < 0.001$, $\eta^2p = .45$) (Figure 77).

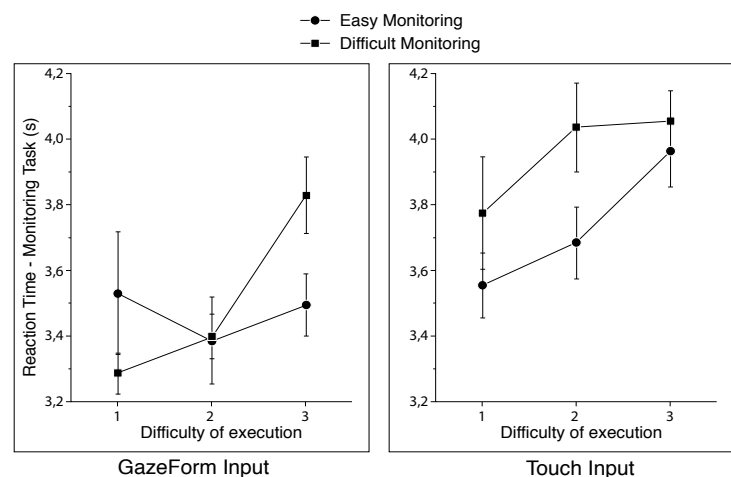


Figure 77. Temps de réaction moyens pour l'entrée *GazeForm* et Tactile à travers les 3 niveaux de difficulté de la tâche de réglage et les 2 niveaux de difficultés de la sous-tâche de surveillance. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne

Temps de latence pour la reprise de tâche

L'entrée *GazeForm* a permis une reprise de tâche plus rapide (c'est-à-dire le temps nécessaire pour passer de la tâche de surveillance à la tâche de réglage) que l'entrée tactile ($F(1, 23) = 7,13$, $p = 0,013$, $\eta^2p = .24$) (Figure 78).

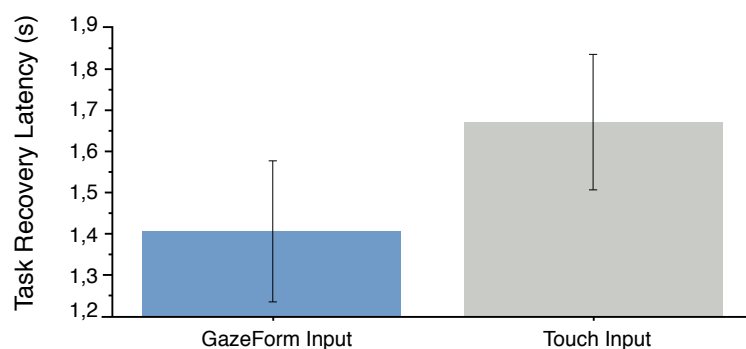


Figure 78. Délais de reprise de tâches pour les entrées *GazeForm* et Tactile. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.

5.7.3 Les données oculométriques

Temps passé à regarder l'écran principal et l'écran inférieur

L'entrée *GazeForm* a permis au participant de libérer son regard de l'écran central inférieur et donc de fixer davantage l'écran situé devant lui pour réaliser la sous-tâche de surveillance ($F(1, 23) = 26.12, p < 0.001, \eta^2p = .53$). Alors qu'ils ne passaient que 66,66 % (SE = 2,88) du temps sur l'écran avant avec l'entrée tactile, ce pourcentage est passé à 81,33 % (SE = 1,76) avec l'entrée *GazeForm* (Figure 79).

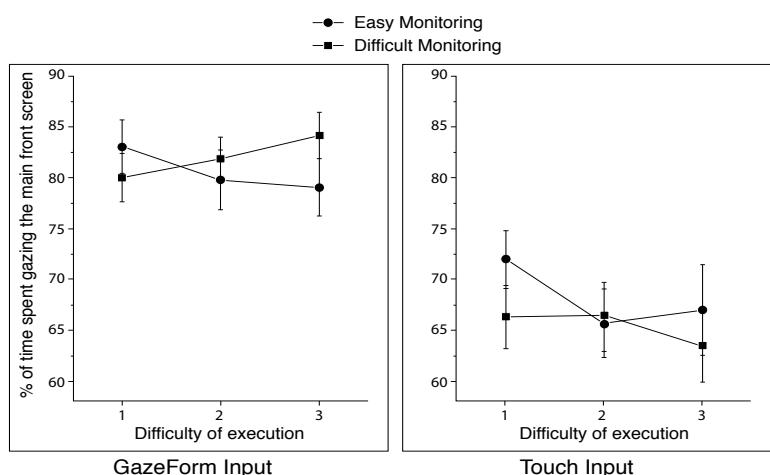


Figure 79. Pourcentages moyens du temps passé à regarder l'écran principal avant pour les entrées *GazeForm* et Tactile sur les 3 niveaux de difficulté de la tâche de réglage et les 2 niveaux de difficultés de la sous-tâche de surveillance. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.

Nombre de transitions entre l'écran de devant et l'écran centrale inférieure

Nous avons ensuite examiné le nombre de transitions entre les deux écrans. Nous avons trouvé un impact significatif de la modalité avec moins de transitions de regard entre les deux écrans en utilisant l'entrée *GazeForm* ($F(1, 23) = 112.74, p < 0.001, \eta^2p = .83$). Il y avait aussi un effet principal de la difficulté de la sous-tâche de surveillance ($F(1, 23) = 66.42, p < 0.001, \eta^2p = .74$), avec un nombre accru de transitions dans la condition de surveillance la plus difficile, et enfin, une interaction modalité $\times$ difficulté de la sous-tâche de surveillance ($F(1, 23) = 55.38, p < 0.001, \eta^2p = .70$). Cette interaction a montré que le nombre de transitions entre les deux écrans n'était pas affecté dans la condition *GazeForm*

alors que le nombre de transitions augmentait à mesure que la difficulté de la sous-tâche de surveillance augmentait dans la condition Tactile (Figure 80).

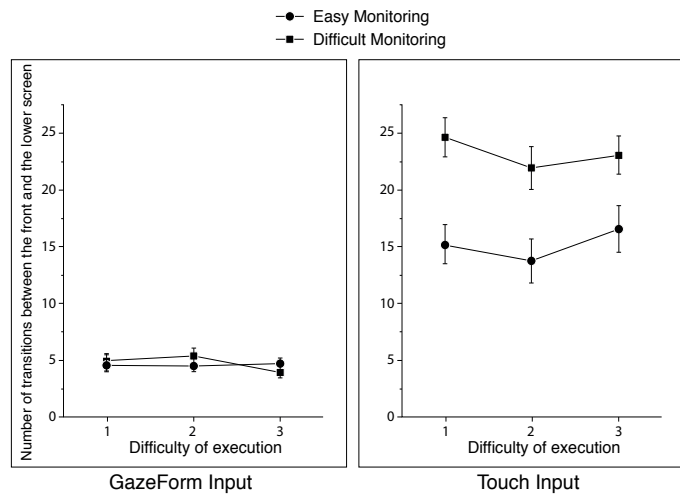


Figure 80. Nombre moyen de transitions entre l'écran avant principal et l'écran inférieur pour les entrées *GazeForm* et Tactile sur les 3 niveaux de difficulté de la tâche de réglage et les 2 niveaux de difficulté de la sous-tâche de surveillance. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type de la moyenne.

5.7.4 Observations complémentaires

Dans cette section, nous présentons les données subjectives recueillies en fin de l'expérimentation contrôlée et lors des entretiens avec les pilotes. Ces données, utilisées pour discuter nos questions de recherche, comprennent des commentaires libres écrits par les participants à l'expérimentation, l'analyse des transcriptions d'une partie des sessions filmées de l'expérimentation et des entretiens exploratoires avec les pilotes.

Commentaires écrits des participants de l'expérimentation

Les participants à l'expérimentation ont été invités à fournir des commentaires libres par écrit en fin de session. Sept d'entre eux ont indiqué qu'ils trouvaient le concept intéressant et que le système était bien conçu, opérationnel et agréable. Plusieurs participants ont fourni des idées de conception concernant le bouton : rétroaction audio, taille, forme, résistance, encoches, accélération et synchronisation. En ce qui concerne la conception tactile, certains participants ont proposé des solutions pour atteindre l'aiguille plus facilement. Les participants ont également suggéré d'améliorer le concept lui-même, c'est-à-dire comment ou quand prendre ou ne pas prendre en compte le regard. En particulier, les commentaires sur la rétroaction audio, la forme et la synchronisation se rapportent à la conception de la transition entre les modalités Tactile et *GazeForm*. Nous avons en outre recueilli des commentaires soulignant les limites du prototype actuel, comme par exemple l'absence de feedback sur l'écran frontal de la position du doigt sur l'aiguille lors de la réalisation de la tâche de réglage.

Analyse des transcriptions vidéo

Un autre ensemble de données a été fourni par la transcription de la moitié des vidéos des sessions de l'expérimentation. Cette analyse à posteriori, nous a

permis de constater que le regard vers la surface tactile lors de la tâche de réglage en mode Tactile uniquement, se produisait généralement lorsque le participant avait perdu l'aiguille et devait repositionner son doigt sur l'interacteur. Nous avons également observé, à l'aide de données enregistrées par le suivi oculaire, que le seul participant ayant un meilleur rendement en entrée tactile regardait constamment l'aiguille et utilisait sa vision périphérique pour détecter les événements de la sous-tâche de surveillance. Un autre commentaire oral important des participants a été que le système nécessitait une brève formation, mais qu'une fois compris et pratiqué pendant la phase de formation, le système pouvait être utilisé facilement. L'un des participants ne se souvenait même pas qu'il avait dû faire un effort pour comprendre le principe de l'interface adaptative en fonction de la position du regard.

Entretiens exploratoires avec des pilotes

Des séances exploratoires menées avec des pilotes ont permis de mieux comprendre les aspects liés à la gestion d'un système critique et aux préoccupations opérationnelles. Afin de discuter de la question de recherche Q2 (Contrôle), nous avons modifié le système pour permettre aux pilotes de choisir le mode de contrôle de l'émergence des boutons : soit totalement automatique en fonction de la position du regard, soit manuel par un tap sur le bouton. Nous avons également inclus un mode semi-automatique où l'émergence des boutons était à la fois gérée par la position du regard et par un tap sur ces derniers.

Les pilotes ont également été invités à faire l'essai de différents paramétrages du temps de latence du déclenchement du processus d'émergence des boutons par le regard ou par un tap physique (Figure 81.b). Ils pouvaient soit ajouter un délai dans la détection de la position du regard pour pouvoir jeter un coup d'œil rapide sans faire rentrer le bouton, soit empêcher l'émergence du bouton en mode tactile pour leur permettre d'effectuer des interactions tactiles continues (Q3). Un panneau de commande (Figure 81.d) leur permet de régler eux-mêmes ces délais et de modifier la vitesse d'émergence/rétraction des boutons. Tous les pilotes ont constaté qu'il est nécessaire d'avoir un mode manuel pour pouvoir continuer à agir même en cas de dysfonctionnement du système automatique (Q2). Cependant, bien qu'ils aient tous réfléchi sur le mode semi-automatique, l'essayant et examinant les avantages potentiels, ils ont tous conclu que c'était trop compliqué. Les réactions concernant les délais pour déclencher l'adaptation ont été mitigées : l'ajout d'un délai pour changer le bouton pouvait permettre de jeter un coup d'œil rapide, mais dans certaines situations, le système a été perçu comme moins réactif. Enfin, une observation issue de l'analyse des vidéos des séances, a répondu aux questions sur l'utilisation du regard pour l'adaptation (Q1, Q2). Nous avons observé que les pilotes étaient capables de s'appropriier l'adaptation en fonction du regard grâce à leur habileté à exécuter des séquences de gestes bien connues et grâce à leur formation de surveillance des systèmes par circuit visuel (Figure 81.c et f). Certains pilotes ont par exemple pu construire une séquence de regards et de gestes (par exemple un geste de dôme en

mode tactile (Figure 81.a), suivi d'un retrait du regard et d'une prise du bouton émergé).

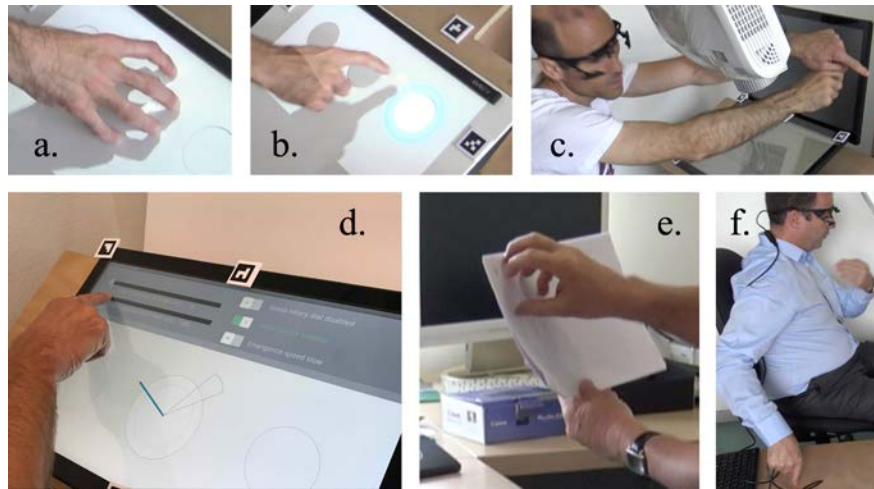


Figure 81. Explorations avec les pilotes. a) geste de dôme ; b) Feedback graphique avant d'aplatir un bouton ; c) commandes FCU dans les séquences visuelles ; d) réglage des délais avec le panneau de commande ; e) brainstorming sur les nouvelles commandes *GazeForm* ; f) commandes sans les yeux.

5.8 DISCUSSION

Dans cette section, nous analysons les résultats de l'expérience contrôlée et des entretiens avec les pilotes, par rapport aux questions de recherche qui sous-tendent l'ensemble de notre travail de recherche et qui ont été précisées dans la section : *Activité oculaire, Sensation et niveaux de Contrôle, Continuité*.

Activité visuelle

Conformément à l'hypothèse H2, le changement de forme des surfaces tactiles permet de réduire la demande visuelle et améliorer la répartition de l'attention, comme le montrent les résultats du suivi oculaire. Alors que les participants n'ont passé que 66,66 % du temps à regarder l'écran avant en modalité d'interaction tactile, ce pourcentage est passé à 81,33 % en modalité *GazeForm*. Ce résultat est d'autant plus important que la sous-tâche de surveillance affichée sur l'écran avant simulait la surveillance de l'affichage principal de vol (PFD) que les pilotes doivent vérifier régulièrement pendant un vol. Des expériences antérieures de suivi oculaire ont confirmé la criticité de la surveillance du PFD dans les circuits visuels (Lefrancois et al., 2016).

De façon générale, dans notre expérimentation, les temps de réaction des participants à la sous-tâche de surveillance sur l'écran avant ont été plus rapides grâce à l'entrée *GazeForm*, confirmant l'efficacité de cet interacteur pour libérer les ressources visuelles et garantir une meilleure performance dans la sous-tâche de surveillance. Autre résultat intéressant : le nombre de transitions du regard des participants entre l'écran principal avant et l'écran central a été considérablement réduit avec l'entrée *GazeForm*. Ce qui confirme que l'utilisation d'une surface tactile reconfigurable peut réduire les mouvements oculaires et donc améliorer donc la distribution de l'attention visuelle ; ce qui dans le cas de

l'expérimentation, était favorable à l'exécution de la sous-tâche de surveillance. Conformément à l'hypothèse H1, L'entrée *GazeForm* a permis une réduction de la charge mentale subjective, mesurée par l'analyse de l'ensemble des dimensions NASA-TLX, toutes en faveur de cette modalité. En outre, la satisfaction perçue était également plus élevée pour l'entrée *GazeForm* que pour l'entrée Tactile, comme le montrent les résultats du questionnaire d'utilisabilité SUS.

Sensation et niveaux de contrôle pour un système critique

Les réponses aux questionnaires et les commentaires libres des participants à l'expérience contrôlée ont montré une acceptation du principe de l'utilisation du regard pour changer la forme de l'interface tactile et la modalité d'interaction. Nous avons découvert, contrairement à nos intuitions initiales, que l'ajout d'un contrôle par le regard ne pénalise pas les activités de surveillance du système. En outre, tous les participants ainsi que les pilotes interrogés ont indiqué qu'une fois compris, le concept pouvait être utilisé sans difficulté et sans effort particulier. L'un des pilotes a même fait des propositions d'application du concept de *GazeForm* à des contrôles génériques associés aux pages d'affichage des systèmes (Figure 13.e). De plus, le fait que les pilotes aient l'habitude d'effectuer des circuits visuels spécifiques tout en les synchronisant avec les gestes dans des séquences d'actions bien formalisées a facilité l'utilisation d'un tel système.

En termes de taux d'erreur et d'efficacité, les résultats comportementaux valident l'hypothèse H3, l'entrée *GazeForm* a surpassé l'entrée Tactile avec une plus grande efficacité (le temps d'exécution 20% plus rapide) et une meilleure robustesse à l'interruption de tâches, avec des latences plus faibles pour reprendre l'action de réglage après une interruption due à la sous-tâche parallèle de surveillance. Contrairement à l'entrée tactile, l'efficacité de *GazeForm* n'a pas été affectée par la difficulté de réglage. Tout à fait logiquement et contrairement à l'entrée Tactile, *GazeForm* ne dépendait pas du niveau d'expérience des participant dans l'utilisation des écrans tactiles.

L'autre dimension qui a été explorée au cours des entrevues avec les pilotes, était la question de la disponibilité des différents niveaux de contrôle. Cette discussion porte sur l'équilibre entre une modélisation complexe pour déclencher des comportements adaptatifs du système et une conception fine pour favoriser l'adaptation de l'utilisateur aux comportements du système, proche de la discussion de Dourish entre le contexte comme représentation et le contexte comme interaction (Dourish, 2004). D'une part, les pilotes ont exprimé la nécessité pour le système de mieux s'adapter à des situations spécifiques, par exemple en préservant la continuité de la modalité dans le cadre d'une tâche tactile (travailler sur une carte interactive), comme indiqué ci-dessous. Une telle perspective implique en fait une modélisation plus fine de l'activité et des schémas cognitifs et sensori-moteurs impliqués dans la coordination geste-regard. Par exemple, augmenter le seuil de durée de fixation du bouton avant de déclencher sa rétraction peut être frustrant (perte de temps) ou utile (permet des regards rapides sans effet, juste pour vérifier la position de la main) selon les tâches spécifiques. D'autre part, afin d'augmenter le sentiment de contrôle sur le comportement du

dispositif *GazeForm*, nous avons fourni un panneau de paramétrage aux pilotes avec la possibilité de régler : le délai avant émergence / rétraction ; la vitesse d'émergence / rétraction ; et les modes, entièrement manuel, mixte, ou entièrement automatique. Il en a résulté un sentiment mitigé quant à la complexité des paramètres et aux comportements possibles qui en découlent.

Continuité

Les implications pour la conception du concept de *GazeForm* incluent une réflexion sur la continuité à plusieurs niveaux : Q3 et H3 se réfèrent à la continuité entre les tâches (reprise des tâches) ; Q3 se réfèrent également à la continuité de la manipulation entre les modalités (le passage du tactile à la forme saisissable et manipulable ou l'inverse) et la continuité de l'interaction au sein d'une modalité (par exemple sans changement de forme, rétraction ou émergence du bouton non désirée).

Concernant la continuité de la manipulation entre les modalités, les résultats de l'expérimentation contrôlée ont montré que les participants n'étaient pas perturbés par le changement de modalité pendant la tâche de réglage (amélioration de 20% du temps d'exécution). Cependant, ils ont montré de moins bonnes performances pour la sous-tâche du geste tactile continu (slider) avec l'entrée *GazeForm* (le temps d'exécution était 20,41% moins rapide). En effet, l'existence de discontinuités physiques résiduelles sur la surface lorsque les boutons rotatifs sont rétractés (surface plane) ne favorise pas l'action tactile continue.

En ce qui concerne la continuité en restant dans une même modalité, les vidéos de l'expérimentation ont montré que *GazeForm* favorisait, par rapport à l'entrée *Tactile*, la discontinuité durant la tâche de réglage comme par exemple de pouvoir effectuer le réglage en plusieurs étapes avec de micro-interruptions dans le geste. En effet, nous avons pu constater qu'en entrée tactile les participants se forçaient pour réaliser le réglage sans interruption en gardant le contact avec la surface afin de ne pas perdre le contrôle de l'objet d'interaction. Un autre aspect exploré avec les pilotes a été d'essayer différents délais pour faire émerger ou rentrer les boutons afin de permettre la continuité dans une même modalité d'interaction tout en permettant des mouvements du regard. Par exemple, l'utilisation d'un délai pour le déclenchement du rabaissement des boutons permet au participant de jeter un coup d'œil rapide sur l'écran central inférieur pour effectuer un contrôle du positionnement de sa main par rapport au bouton émergé. Nous avons pu constater que l'ajout de délais lors des différents déclenchements du système pouvait apporter une solution dans un contexte très précis mais altérerait globalement la confiance que le participant pouvait avoir dans le fonctionnement du système. Un autre aspect qui n'a pas été mis en œuvre mais qui a été discuté avec les pilotes est la possibilité de conserver le bouton et de rester dans l'entrée *GazeForm* tout en le regardant, à condition que le bouton soit en main.

5.9 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté le concept *GazeForm*, une interface tactile reconfigurable offrant une modalité d'interaction adaptée en fonction de la direction du regard. A partir des problèmes d'utilisabilité des écrans tactiles des nouveaux systèmes avioniques, observés dans la section 2.5 et confirmés par l'approche théorique (chapitre 3), et plus particulièrement les problèmes de surutilisation du canal visuel et d'augmentation de la charge cognitive, nous avons imaginé un dispositif qui permet de « libérer » le regard en l'utilisant.

Nous avons présenté la conception, la réalisation et l'évaluation expérimentale quantitative et qualitative du système. Les trois axes de recherche définis dans l'introduction (*Activité oculaire*, *Sensation et niveau de Contrôle*, *Continuité*) ont structuré notre démarche et ont été utilisés pour analyser les résultats. Nous avons trouvé que comparativement à un écran tactile, le passage d'une surface tactile plate à un bouton manipulable en fonction de la position du regard permettait entre autres, d'améliorer la distribution de l'attention, de réduire les mouvements oculaires, d'améliorer la performance, de diminuer la charge cognitive. D'autre part, nous avons confirmé que le concept de l'utilisation du regard pour contrôler la forme d'une interface est caractérisé d'*acceptable*, par des pilotes en activité, pour la gestion d'un système critique. Enfin, par rapport au concept *From Surface To Surface* et à la question de *Continuité*, nous avons démontré que le passage de la surface tactile qui fait écran (en bloquant le regard), à la surface tangible qui implique un processus perceptif avec la participation d'un corps sentant et sensible, ne perturbe pas les utilisateurs et permet d'améliorer le temps d'exécution des tâches de réglages.

Nous sommes convaincus que ce concept peut être généralisé à d'autres contextes présentant une forte division de l'attention visuelle (conduite automobile, salle de contrôle, appareil tactile portable en mobilité) et qu'il peut être exploré plus avant dans la recherche sur les interfaces adaptatives et les interactions tangibles et incarnées. De nombreuses questions restent à éclaircir notamment autour de la distribution du contrôle entre les gestes et le regard, du couplage entre le geste et le changement de forme (et de modalité) et sur l'amélioration des éléments contextuels et des délais pour déclencher l'adaptabilité.

Pour s'extraire du contexte d'étude et pouvoir généraliser la connaissance produite à d'autres environnements nous analyserons, dans le chapitre 7, les transformations topologiques du prototype avec des outils théoriques du domaine de l'interaction homme-machine. Les données produites sont articulées avec les théories de la perception et de l'interaction incarnée (étudiées dans le chapitre 3). Elles sont également utilisées comme un élément de base pour proposer un espace de conception pour les interfaces tactiles reconfigurables utilisables dans un contexte d'activité avec une forte division de l'attention visuelle.

5.10 CONTRIBUTIONS

- *Proposition d'un concept d'interface adaptative en fonction de la position du regard*
- *Conception et réalisation d'une surface tactile reconfigurable offrant une modalité d'interaction adaptée en fonction de la direction du regard et intégration à une plateforme reproduisant l'environnement physique d'un cockpit de l'aviation commerciale*
- *Production de résultats expérimentaux quantitatifs (performances, satisfaction, mouvements oculaires) et qualitatifs (activité visuelle, niveau de contrôle, pertinence pour un système critique) sur l'utilisation d'une surface tactile reconfigurable en fonction de la position du regard*
- *Nous avons trouvé que comparativement à un écran tactile classique la reconfiguration d'une surface tactile par émergence d'un contrôleur physique permettait de : réduire l'attention visuelle, de réduire les mouvements oculaires, d'améliorer la performance, de réduire les erreurs de réglages. Nous avons confirmé que le concept de l'utilisation du regard pour contrôler la forme d'une interface est « acceptable » pour la gestion d'un système critique.*
- *Enrichissement de l'espace de conception s2s (présenté dans la section 7.3) et notamment les propriétés de « Couplage Forme / Contexte » et « Homogénéité / Hétérogénéité »*

6 MULTI-PLIÉ : FROM SURFACE TO SURFACE POUR FAVORISER LA COLLABORATION ET LA CONSCIENCE DE LA SITUATION

Tout visible est taillé dans le tangible
(Merleau-Ponty and Lefort, 1979)

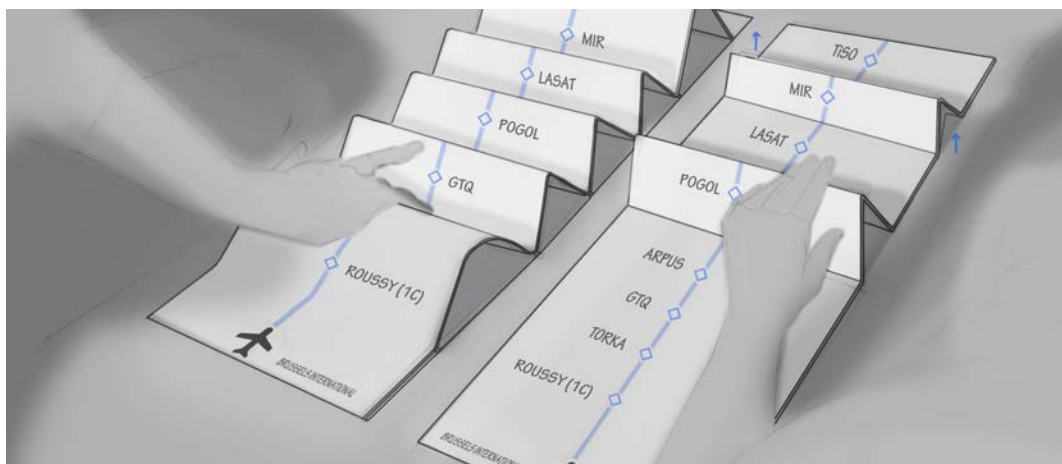


Figure 82. Dessin de principe du concept *Multi-plié* ©Claire Lavenir

Dans la section 2.5 sur les effets potentiels de la tactilisation des systèmes avioniques nous avons mis en évidence les faiblesses de cette modalité en termes de performance et de collaboration. L'exploration autour du concept *Multi-plié* vise à aborder ces limites au moyen d'une approche concrète qui tient compte des principes de l'interaction incarnée (section 3.2.1) et du statut du corps dans l'activité de pilotage (section 2.3). Nous cherchons à favoriser les aptitudes sensori-motrices des pilotes et permettre ainsi de garantir à la fois un niveau de

performance élevé et une collaboration plus efficace entre les membres de l'équipage. D'autre part, ce concept nous permet d'enrichir le travail initié avec *GazeForm* sur la question de Continuité lors du passage d'une surface écran à une surface tangible (From Surface to Surface). Le concept *Multi-plié* d'un écran tactile pliable à la manière d'un accordéon a été élaboré pendant plus d'un an au cours d'une série d'ateliers réalisés avec l'équipe de conception d'Airtius et a donné lieu à la réalisation de deux prototypes fonctionnels (Figure 83), présentant des variantes du concept. Un premier prototype explore comment plusieurs petits écrans tactiles inclinables peuvent incarner le concept de surface accordéon ; le second prototype développe le concept en se basant sur l'implémentation d'une surface tactile continue imprimée en 3D. Ces deux prototypes ont été explorés et évalués qualitativement lors de sessions participatives menées avec des pilotes d'avions de ligne. Les évaluations ont été analysées suivant les trois axes posés par les questions de recherche présentées dans l'introduction et déjà en partie traitées par l'évaluation du prototype *GazeForm* (chapitre précédent) : *Activité oculaire, Sensation et niveaux de contrôle pour un système critique, Continuité*.

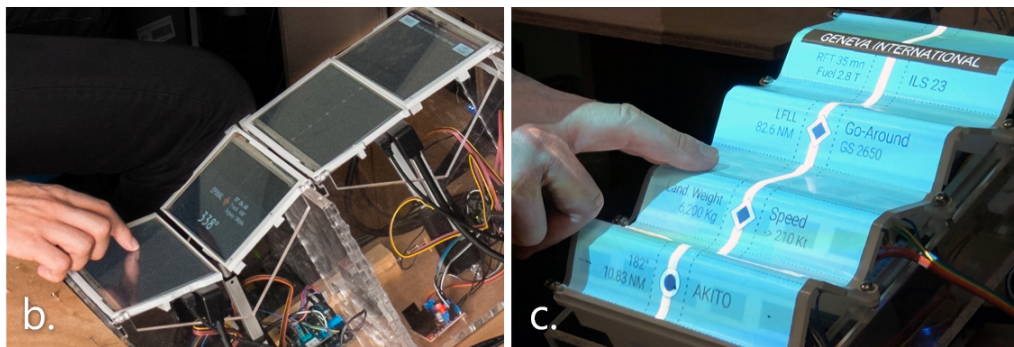


Figure 83. b. Prototype de la série d'écrans articulés, c. Prototype de la surface d'affichage tactile plissable.

Dans la suite de cette partie, après avoir présenté un rappel de l'état de l'art (déjà abordé dans la section 3.3), nous décrivons les méthodes que nous avons utilisées et fournissons quelques rappels sur les dimensions de l'activité du poste de pilotage que nous adressons. Après une section sur le travail de conception, la réalisation technique des deux prototypes est explicitée. Les sections suivantes présentent les résultats de l'exploration menée avec les pilotes suivant les trois axes de recherche (*Activité oculaire, Sensation et niveaux de contrôle, Continuité*). Nous terminons par une caractérisation synthétique du concept de conception. Les résultats de cette étude sont repris dans le chapitre 7 pour caractériser les principes d'un espace de conception pour des interfaces tactiles reconfigurables.

6.1 ÉTATS DE L'ART

Le concept *Multi-plié* s'inspire des dispositifs reconfigurables (section 3.3.2), des écrans articulés (section 3.3.2.1), des écrans pliables ou enroulables (section

3.3.2.2). Les apports de ces différents champs théoriques ainsi que le positionnement de notre travail sont consultables dans les sections susmentionnées.

6.2 METHODES

L'étude du concept *Multi-plié* s'est déroulée sur plus d'un an et s'inscrit dans le déroulement du projet Airtius. Le travail d'analyse de l'activité, basé sur les données et les observations d'études antérieures présentées dans les sections 2.3 et 4.1, a été complété par des séances d'observation, des entretiens contextuels et des ateliers participatifs menés avec des pilotes de l'aviation commerciale.

Durant cette phase d'analyse de l'activité spécifique au concept *Multi-plié*, nous avons structuré la phase de conception sous forme de « sprints » (similaires aux itérations de la méthode Agile), d'une durée de 2 à 4 semaines, et menés avec des designers, ingénieurs et chercheurs du consortium Airtius (section 4.2). Les différentes séances, ateliers et contributions apportées par chacun durant les sprints, nous ont permis d'élaborer des prototypes basse fidélité en carton et plastique basses fidélités qui ont été un support essentiel à la définition, l'amélioration et la précision du concept. Nous avons ensuite collaboré avec un stagiaire en mécanique, recruté pour une durée de 5 mois pour réaliser les deux prototypes fonctionnels. Une réalisation par itérations et présentation de versions intermédiaires a permis de valider progressivement les choix techniques, électroniques et mécanique. Enfin, deux itérations de quatre séances d'évaluation menées avec 5 pilotes de ligne ont permis d'approfondir l'exploration du concept au travers de la manipulation des deux différents prototypes. Les deux explorations itératives ont été menées successivement (à deux mois d'intervalle), pendant 2 séries de 4 ateliers participatifs de deux heures chacun. Ces huit séances participatives ont été filmées (16 heures de vidéo) et ont été entièrement transcrites (~ 200 pages de transcriptions). Environ 177 citations ont été extraites et les principales caractéristiques ont été analysées selon une approche ethnographique.

6.3 ANALYSE DE L'ACTIVITE

Le projet *Multi-plié* s'inscrit dans le contexte d'évolution des interfaces pilote-système de l'aviation commerciale, déjà présenté au chapitre 2. Même si le développement de la technologie tactile dans les cockpits offre de nombreux avantages pour les pilotes (manipulation directe, large surface d'affichage, reconfigurabilité en fonction de la phase de vol, etc.) cette évolution pose de nombreuses questions sur les performances, l'utilisabilité et la collaboration en situations aéronautiques variées (turbulences, forte charge cognitive, saturation du canal visuel, etc.). Nous nous proposons de répondre en partie à ces problèmes de performance et de collaboration avec le concept d'une surface tactile pliable dynamiquement reconfigurable.

6.4 CONCEPTION

Durant les différents ateliers participatifs menés avec les pilotes nous avons exploré plus de 150 idées de conception pour essayer de répondre aux limites des écrans tactiles dans les cockpits d'avions de ligne (cf. section 2.5). En utilisant des matériaux comme le papier, le carton et le plastique nous avons fabriqué une quinzaine de prototypes relatifs au concept général « accordéon », avec différents niveaux de fidélité (Figure 84). Ces prototypes physiques légers ont été utilisés pour réaliser des prototypes vidéo basés sur des scénarios d'activités (checklists, plan de vol, gestion des systèmes, etc.). Ils ont également servi lors des explorations avec les pilotes pour librement préciser ou discuter des propriétés concernant les dispositifs (géométries, résolutions, structures, principes ergonomiques) et proposer de nouveaux usages et interactions pour le cockpit.

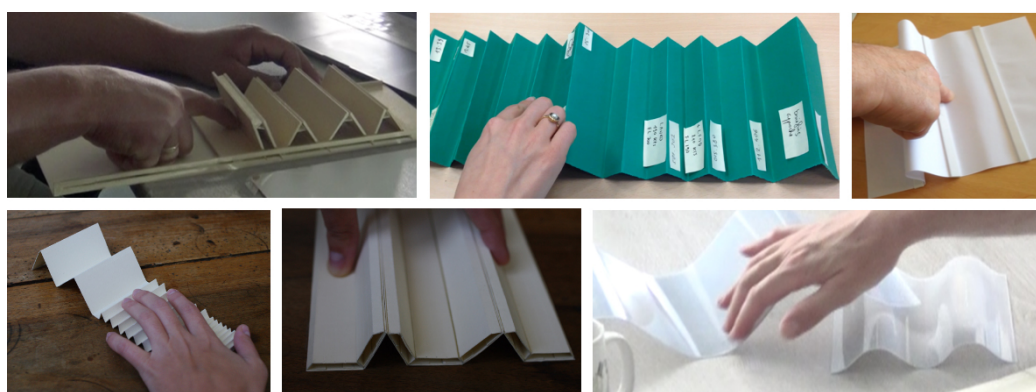


Figure 84. Exemples de prototypes papier, carton et plastique du concept *Multi-plié*

6.4.1 Première articulation d'un concept surface d'affichage tactile pliable

Le concept d'affichage pliable est apparu initialement pour répondre aux besoins de séquençage des différentes tâches de pilotage et de l'organisation des procédures collaboratives. Le premier prototype papier, disposé entre les deux pilotes, permettait de réifier les données de vol sous forme de plis et de structurer le déroulement des tâches prescrites. Ce premier artefact de papier plié en accordéon, manipulé horizontalement ou verticalement (Figure 84), a été rapidement identifié, par les pilotes, comme une solution particulièrement riche et intéressante pour répondre aux limites des surfaces tactiles lisses. D'autres versions de prototypes ont ensuite été déclinées pour explorer des variations de fréquences et de hauteurs des plis, voire de plis multi-échelles, ainsi que pour exprimer différentes qualités de matériaux (dureté, rugosité...). Plusieurs de ces prototypes ont été utilisés par les pilotes au cours des séances d'exploration du concept présenté dans la section 6.6.

6.4.2 Spécification des caractéristiques physiques du dispositif

Le principe de la création de plis sur une surface d'affichage interactive est apparu comme un moyen d'offrir aux pilotes différentes formes d'interactions

tangibles, selon l'échelle des plis : des encoches suffisamment profondes pour guider le geste physique et ajuster une valeur, des mini-plis pour créer un effet de surface, des plis de différentes tailles pour hiérarchiser les priorités... A partir de ces premières étapes de conception, nous avons défini quelques caractéristiques nécessaires à la mise en œuvre technique des prototypes fonctionnels. Nous avons tout d'abord opté pour un positionnement du dispositif sur la partie centrale basse du « Main Instrument Panel » (Figure 3) afin de pouvoir dérouler les différents scénarios de conception. La taille du dispositif ainsi que la position par rapport aux pilotes ont été déterminées pour permettre la lisibilité des informations et l'interaction tactile sans effort ou gêne. Le nombre de plis (4 plis positifs) ainsi que leur taille répondent à des exigences ergonomiques de manipulation à une main. Ces spécifications initiales ont été affinées lors des explorations techniques, notamment lors des essais de diverses solutions d'actuation pneumatiques ou mécaniques de formation des plis ou encore pour le choix des matériaux de la surface.

6.5 PROTOTYPES

6.5.1 Plate-forme de prototypage et d'évaluation

Pour la conception du prototype et les essais pilotes, nous avons utilisé la plate-forme « bois » de conception et de test d'essai présentée à la section 4.1.3. Les prototypes ont été disposés sur la partie centrale basse, entre les 2 opérateurs ; durant les séances d'exploration les pilotes étaient assis en place gauche et pouvaient manipuler les prototypes de la main droite.



Figure 85. La plate-forme de prototypage et d'évaluation avec le prototype *Multi-plié 1* positionné dans la partie centrale (*Cockpit Pedestal*).

6.5.2 Prototype 1 : série d'écrans tactiles articulés

Le dispositif d'écrans multiples articulables est composé de 4 écrans tactiles inclinables, qui peuvent être orientés pour former des plis positifs (Figure 86.a) et négatifs. La modification de l'inclinaison de l'écran est gérée par un microcontrôleur relié à des actionneurs linéaires. Un composant logiciel principal gère : 1.) l'affichage de l'interface graphique en mode multi-écrans, 2.) la récupération des entrées tactiles et la détection et la modification de la position des moteurs,

3.) l'interaction tactile avec les objets de la scène graphique. Les interactions tactiles permettent également à l'utilisateur de contrôler dynamiquement l'inclinaison d'un ou plusieurs écrans (Figure 86.b).

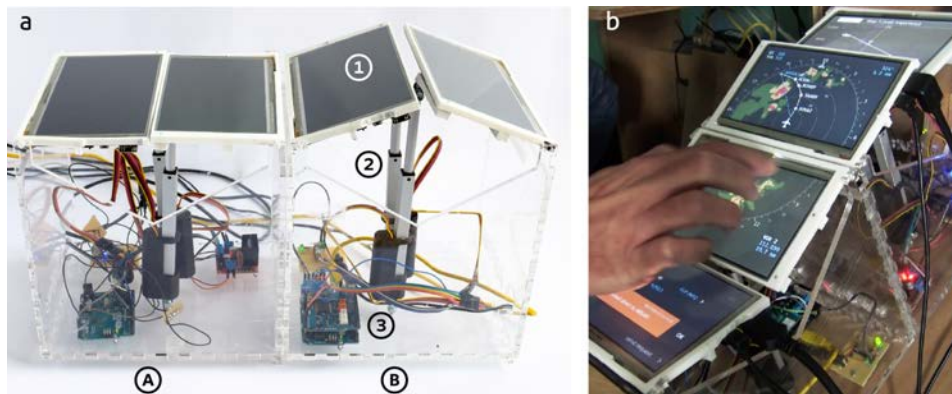


Figure 86. a) série d'écrans articulés composée de 2 modules (A et B). Chaque module est composé de deux écrans tactiles 7" (1), d'un microcontrôleur Arduino (2) et de 2 actionneurs linéaires (3)
b) le dispositif interactif d'afficheurs articulés en action, intégré à notre plate-forme de test.

6.5.2.1 Mise en œuvre

Le système est composé de 2 modules identiques, comportant chacun 2 écrans (Figure 86.a). Pour garantir la lisibilité et le confort d'interaction tactile, nous avons sélectionné des écrans tactiles capacitifs de 7 pouces avec une résolution de 1024×600 pixels. La structure du module est réalisée à partir de plaques de PMMA découpées au laser. Les supports d'écrans imprimées en 3D garantissent les mouvements et les articulations avec les actionneurs linéaires.

Pour assurer un mouvement d'inclinaison suffisamment rapide et large des écrans (+20° et -30°), nous avons choisi des actuateurs linéaires Acteonix® P16-P avec une course de 100mm, une vitesse de déplacement de 34mm/s et une force nominale de 25 newtons (Figure 86.a). Ces performances ont été validées lors de tests effectués par l'équipe de conception. Le déploiement de l'actionneur linéaire est contrôlé par une carte moteur basée sur un double pont en H (L298) connecté à une carte Arduino® Uno (Figure 86.a). Nous avons choisi d'intégrer une interface de contrôle électronique pour chaque module afin de les rendre indépendants les uns des autres. Cette configuration par modules indépendants de 2 écrans offre un plus grand potentiel d'exploration, par exemple en les disposant côte à côte, ou encore horizontalement, verticalement, ou séparément.

6.5.2.2 Architecture logicielle

Le système est composé de deux logiciels indépendants communiquant par le port série. L'un commande les actionneurs linéaires, développé en C et fonctionnant sur la carte Arduino®. L'application principale, développée avec Qt Creator, en C++ et Qt5 (QML) et hébergée sur une machine Linux, permet d'exécuter des scénarios d'interaction prédéfinis pour le cockpit, de gérer l'affichage des données, de récupérer les entrées tactiles, de contrôler le dispositif tangible et de générer des logs.

Pour contrôler l'angle d'inclinaison des écrans, l'ensemble des valeurs d'angle cible est envoyé via le port série vers le composant Arduino®. Ces valeurs angulaires positives ou négatives sont converties en longueur pour le déplacement de l'actionneur (Figure 86.a).

6.5.3 Prototypé 2 : surface d'affichage tactile « plissable »

Afin d'explorer plus avant le concept "*Multi-plié*", nous avons dans le cadre d'une seconde itération, conçu et développé un deuxième prototype basé sur l'utilisation d'une surface continue, mince, flexible et déformable par « plissage ». A la différence du premier prototype composée de 4 surfaces juxtaposés cette nouvelle version a été conçue autour d'une seule grande surface d'affichage tactile et flexible nous permettant d'explorer les propriétés de continuité et d'homogénéité de la surface déformable. (Figure 87.b).

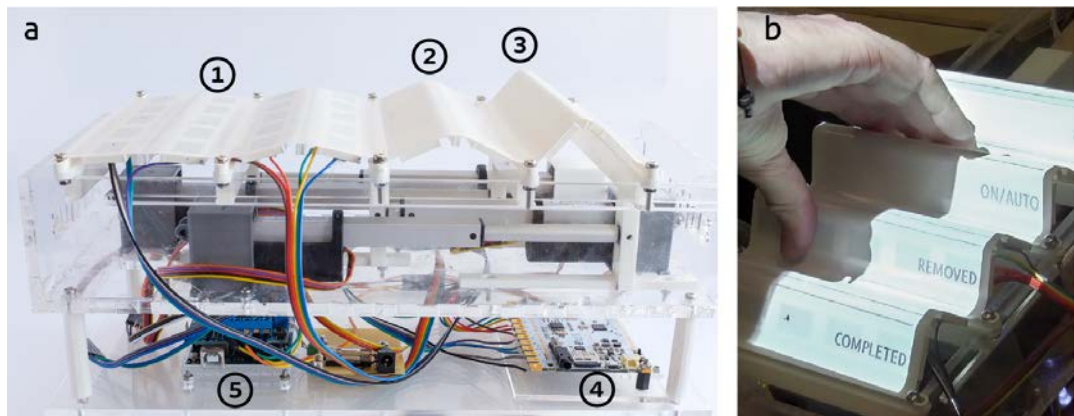


Figure 87. Surface d'affichage tactile plissable ; a) Vue en coupe des différents états de la surface d'affichage plissable. (1) plat, (2) 1 demi pli positif, (3) 1 pli positif, (4) Carte tactile, (5) microcontrôleur Arduino ; b) surface plissable en cours de tests, avec projection vidéo des informations.

6.5.3.1 Mise en œuvre

Même si des écrans tactiles flexibles commencent à être disponible chez certains fournisseurs, nous avons préféré concevoir notre propre système afin de produire des prototypes itératifs évaluable et de pouvoir intégrer progressivement les spécifications de déformations et de rigidités de la surface définies lors des séances de conception.

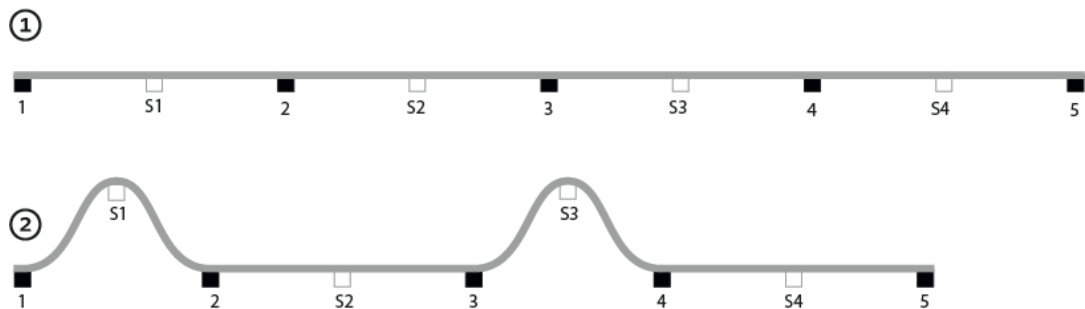


Figure 88. Schéma de déformation de la surface tactile plissable ; 1) Positions des différents points de déformation avec la surface complètement aplatie, 2) Positions des différents points de déformation avec les sommets S1 et S2 en position pliée.

Dans les premières étapes de la phase de conception, nous avons, à l'aide de tests réalisés avec des prototype en carton, défini la dimension de la surface totale ainsi que la forme voulue des plis et donc les positions des points paramétrant la déformation. Comme le montre le schéma de déformation de la Figure 88 ainsi que la vue latérale de la Figure 87.a, certains points de la surface sont fixés sur une base mobile (carrés noirs sur le schéma) alors que d'autres sont laissés libres de créer des plis (carrés blancs sur le schéma). La surface flexible est réalisée en 3D par fabrication additive sur une imprimante Ultimaker® 3. Plusieurs essais d'impression réalisés avec des paramètres différentes du profil d'épaisseur de la bande, intégrant des parties plus fines permettant de créer les plis ont permis d'affiner les caractéristiques à la fois de rigidité et de souplesse de la surface, et de son ressenti lors de la manipulation. Pour rendre la surface tactile, nous avons imprimé, en même temps que la structure en PLA blanc, une grille de points de contact capacitifs avec du PLA conducteur (rectangles noirs sur la Figure 89). L'intégration des zones tactiles dans la structure de la surface par le même procédé de fabrication permet d'obtenir une surface mince et flexible. Les données de contact tactiles sont récupérées par une carte Bare conductive® et envoyées à l'application principale par le port série.



Figure 89. Vue de dessus de la surface plissable ; 1) PLA conducteur intégré dans le PLA blanc (zones en pointillées) ; 2) partie supérieure de la surface non tactilisée.

6.5.3.2 Mécanisme de déformation

Pour déformer la surface, nous utilisons 4 vérins linéaires Actuonix® P16-P d'une course de 100mm (Figure 87.a), positionnés horizontalement au-dessous de la surface souple. L'extrémité de chaque vérin est physiquement reliée à un axe transversal qu'il déplace de façon contrôlée par l'application. Ce déplacement permet le positionnement précis d'un des quatre points de transformation de la surface et la réalisation des plis selon la configuration recherchée. Les informations de déplacement des actuateurs linéaires sont reçues et traitées par une carte moteur couplée à un microcontrôleur Arduino.

6.5.3.3 Architecture logicielle

Le système de ce second prototype repose sur deux applications très similaires à ceux du premier prototype. L'application principale, développée dans

l'environnement Qt Creator (C++, QML), permet d'exécuter des scénarios d'interaction pour le cockpit, de gérer l'affichage des données, de contrôler la carte Arduino®, de récupérer les entrées tactiles et de modifier la position des actionneurs linéaires.

6.5.3.4 *Gestion de la déformation de l'affichage sur la surface plissée*

La carte Arduino® envoie les positions en temps réel des actionneurs linéaires à l'application principale. Cette dernière les interprète pour recalculer l'image projetée de manière à ce qu'elle apparaisse sans distorsion sur la surface flexible. Cet ajustement de la vidéoprojection se fait de façon continue et synchronisée avec les modifications de la forme de la surface. Le système, développé par Ingenuity i.o, l'une des PME partenaires du projet Airtius, est conçu pour être facilement reconfigurable, le calibrage de la projection ne prend que quelques minutes, sur la base d'un réglage initial de deux ensembles de points de référence, un réglage pour une configuration où la surface est entièrement plane, un réglage pour une configuration où la surface forme 4 plis complets. Le système ajuste la distorsion de l'image projetée à partir d'une interpolation géométrique entre ces deux références.

6.6 RESULTATS DES SEANCES D'EXPLORATION AVEC LES PILOTES

Dans cette section, nous présentons l'ensemble des résultats des deux itérations de 4 ateliers chacun (voir la section Méthodes) organisée avec cinq pilotes de l'aviation commerciale (anonymisés sous les noms P1 à P5). Ces séances exploratoires se sont déroulées sur la plateforme d'évaluation (Figure 85) ; les pilotes étaient assis en position gauche et pouvait manipuler les prototypes pour rejouer les scénarios de conception que nous leur avions préalablement présentés. Les deux séries de scénarios (Tableau 1) ont été choisies en fonction d'un ensemble de critères : pertinence des systèmes et des activités par rapport au concept de la surface articulable et plissable (p. ex. aspects temps/rythme, guidage du geste, séquençement etc.), choix ergonomique de l'emplacement (p. ex. actions collaboratives, conscience de la situation, alarmes etc.). Toutes les interfaces graphiques présentées aux pilotes étaient basées sur des données de vol réelles : plans de vol, check-lists, écrans de cockpit... et adaptées aux caractéristiques techniques et physiques de chaque prototype (nombre et taille des plis, résolution d'affichage et de nombre de points tactiles). Les scénarios, données et graphiques mis en œuvre ont été validés par des experts du domaine (ingénieurs ou pilotes). Nous avons également exploré, lors de la seconde session d'ateliers, un certain nombre de variantes de scénarios suggérées par les pilotes pendant les séances de la première itération.

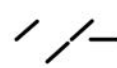
Scénarios	Changements de forme	
Prototype 1 : série d'écrans tactiles articulés		
S1. Changement de cap après la réception d'un message de l'ATC (Figure 38.b)	a. Notification par inclinaison	
	b. Faciliter l'action tactile	
	c. Feedback par impulsion tous les 10° d'angle	
S2. Modification d'un plan de vol suite à la réception d'un message ATC (Figure 41.b)	a. Création pli pour notification	
	b. Le pilote modifie l'inclinaison des écrans pour interagir sur la vue étendue de la carte	
S3. Consultation des pages systèmes sur l'ECAM (Figure 45.b)	a. Feedback par impulsion lors du changement de page	
Prototype 2 : surface d'affichage tactile « plissable »		
S4. Confirmation de la vérification d'un point de checklist	a. Le pli relevé indique le point en cours de traitement dans la checklist. Pour confirmer ce point le pilote enfonce le pli. Une oscillation du pli indique la validation de l'action.	
S5. Gestion d'un plan de vol. Différentes variantes avec des contraintes d'approche (figure 38.d)	a. Apparition d'un pli pour indiquer une information sur un point de passage	
	b. Le pilote enfonce les plis progressivement pour valider la réalisation d'une séquence d'actions	
	c. Applatir une zone pour afficher de l'information additionnel sur un point de passage	

Tableau 1. Les scénarios de conception mises en œuvre pour les deux itérations menées avec les pilotes, avec les deux prototypes *Multi-plié* P1 et P2

L'analyse des enregistrements vidéo, des commentaires et observations des pilotes nous a permis de confirmer des idées et intuitions intégrées aux prototypes mais aussi de faire émerger des propriétés non envisagées. La reformulation par les pilotes de certaines propriétés avec des termes de l'activité nous a permis de confirmer en partie la pertinence du concept et son adéquation avec le contexte aéronautique. Nous allons maintenant détailler ces résultats dans la suite de cette section. Les différents commentaires ont été analysés et regroupés suivant trois catégories qui reprennent les axes des questions de recherche présentées dans l'introduction :

Activité oculaire : analyse des propriétés des prototypes en fonction de la structure et des possibilités de transformation permettant de faciliter la perception visuelle, réduire la demande d'attention visuelle et améliorer la distribution de l'attention.

Adaptation aux besoins de l'activité, sensation et niveaux de contrôle pour un système critique : évaluation de l'adhésion des pilotes au concept de conception et analyse des propriétés des prototypes en fonction des exigences de l'activité (performance, collaboration, utilisabilité en situation dynamique, support de la programmation et du déroulement de séquences, etc.).

Continuité : analyse des propriétés des prototypes permettant de favoriser la continuité des interactions. Continuité de manipulation lors des transitions entre les différents états de forme et continuité entre les tâches ou les phases de vol.

6.6.1 Activité oculaire

Forme, mouvements et perception visuelle.

Les pilotes ont souligné les effets bénéfiques de la forme du support d'affichage et de ses déformations sur la **perception visuelle**. C'est une propriété que nous n'avions pas imaginé lors de la conception mais qui a été explicitée à de nombreuses reprises. D'après les pilotes, cette amélioration de la perception visuelle est favorisée d'une part par le mouvement du support d'affichage et d'autre part par le lien entre le contenu et la forme de l'afficheur.

Tout d'abord, l'importance du lien structure/contenu est explicitée par certains pilotes durant la discussion autour des scénarios S2 et S3 (Tableau 1) sur le prototype 1 : P2 en parlant d'un plan de vol avec une étape par écran « *le fait de segmenter chaque élément je trouve que c'est quelque chose d'intéressant* »; ou encore P1 à propos de l'affichage des informations systèmes sur les 4 écrans (Figure 90.c) « *l'avantage de ce système avec la ségrégation des écrans, c'est que tu as un écran une fonction (...) tandis qu'un grand écran où tu aurais les mêmes informations présentées, tu y prêterais moins d'attention* ». Par ailleurs, sur le prototype 2 et le scénario S5, certains pilotes ont remarqué la création, par la forme et la disposition, de lien de dépendance entre des informations visuelles liées à une check-list (Figure 90.a). Néanmoins, sur le prototype 1, l'épaisseur des bords ainsi que la distance entre les écrans, dans certaines positions, ont été pointées, par un pilote, comme risquant de perturber la lisibilité et la cohérence d'un contenu distribué sur les différentes surfaces (Figure 90.b).

Au-delà du lien forme / contenu graphique, nous avons relevé de nombreux commentaires relatifs à la forme seule et à la transformation. Tout d'abord, les pilotes ont souligné l'**effet visuel** d'une forme se détachant d'un ensemble, comme par exemple dans les situations où un seul pli est relevé pour attirer l'attention des pilotes (scénario S5.a) : « *c'est de la vraie 3D ... on est vraiment interpellé en trois dimensions* » (P4). En général, pour des raisons d'**efficacité visuelle**, les pilotes préfèrent la saillance par la forme que par les effets graphiques 2D. De plus, ils ont apprécié et considéré comme très fort visuellement les transformations de la forme de l'interface. Ces transformations comprennent des changements de pliage (scénarios S2.a et S5.a), ainsi que des modifications d'inclinaison d'écran pour notifier un message ou une alerte (scénario S1.a) « *c'est vrai que d'avoir quelque chose qui vienne d'une manière différente t'interpeller [geste de battement] c'est plutôt pas mal* » (P1). Ils ont également suggéré que ces transformations pourraient être combinées à des couleurs aéronautiques codifiées (couleurs d'état normées du CDS, vert, ambre, rouge, magenta ...) et ainsi renforcer le message en ajoutant des renseignements supplémentaires, comme le degré d'urgence ou un niveau de gravité « *Au début tu peux peut-être*

avoir la surface qui commence juste à se lever mais un tout petit peu, après ça elle se lève complètement, au maximum, et après tu peux avoir la graduation de code couleur si vraiment c'est pas traité » (P1).

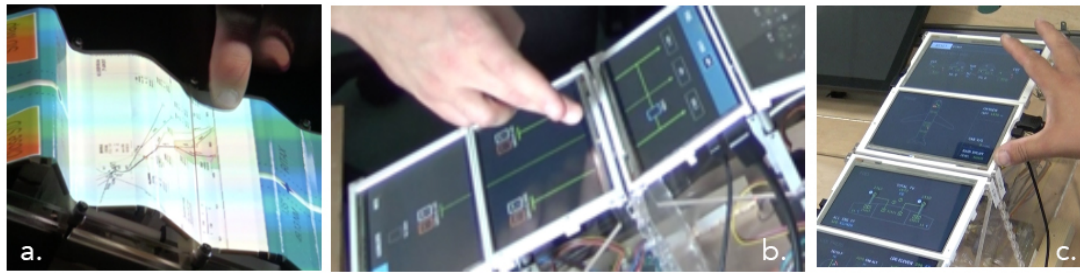


Figure 90. a) Affichage d'une carte complémentaire en dessous d'un point de passage (prototype *Multi-plié* P2); b) Schéma des systèmes coupé par les bords des écrans (prototype *Multi-plié* P1); c) Des pages systèmes structurés par la forme et la disposition des écrans (prototype *Multi-plié* P1).

Intelligibilité de la structure et réduction de la demande d'attention visuelle

Les pilotes ont apprécié le fait que les prototypes proposaient un changement de forme sur un seul axe, permettant d'appréhender rapidement le fonctionnement et ainsi d'anticiper le comportement du système. En effet, un pilote (P3) a explicité qu'avec le mouvement prévisible des écrans « on sait **où il faut regarder** » alors que sur un grand écran statique « on a tout, dans tous les sens [dessine avec les mains des zones un peu partout] (...) qui vont tout autour, au milieu, en bas, à droite à gauche, et c'est vrai que pour savoir **où regarder** ». D'autre part, le fait que les prototypes présentent une structure régulière de plis également espacés **favorise l'interaction sans les yeux** en facilitant la localisation des éléments les uns par rapport aux autres par le canal tactilo-proprio-kinesthésique « la validation sur un bord ça peut être fait quasiment **les yeux fermés** » (P2). Cette propriété a été confirmée par le pilote P5 qui « peut tout faire les **yeux fermés** [ferme les yeux] parce du coup j'ai du tactile » et ce particulièrement dans les situations de faible visibilité comme la « fumée dans le cockpit ». Enfin, les schémas de déformation simples et répétitifs peuvent aider à percevoir un contexte global, tel que l'état des réglages dans une phase du vol, comme l'a confirmé un autre pilote : « en fonctionnement normal, nous aurons toujours les **mêmes déformations** » (P5). Néanmoins, tout en considérant positivement la simplicité de la structure répétitives du pliage, ils auraient aimé pouvoir la déformer suivant des modèles plus complexes. Comme l'a souligné le pilote P5 qui aimerait tirer « sur la forme » pour « créer comme un reminder » (Figure 91.a).

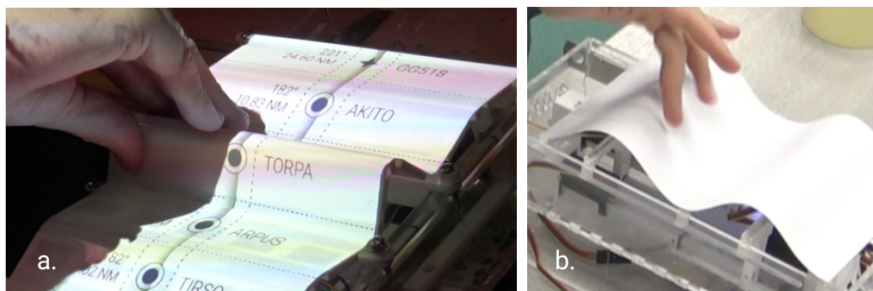


Figure 91. Prototype *Multi-plié* P2 : a) tentative de déformer le pli pour créer un rappel, b) Déplacement du doigt par glissement sur la surface continue

Stabilisation, tangibilité et distribution de l'attention visuelle.

L'une des raisons de concevoir une surface non plane pour les pilotes était de leur permettre de reposer physiquement leur main tout en interagissant avec la surface, en particulier dans des conditions instables. Ils ont confirmé ce besoin et, comme le montre la Figure 92.a, ils ont exploré la distance entre deux plis afin de vérifier que « *tu as un repose-main [cale sa main sur une vague de la maquette en plastique] et en même temps tu as une interface [essaye plusieurs interactions avec les doigts]* » (P4). Dans ce cas, ils ont souligné la nécessité de désactiver le tactile sur la surface qui sert de stabilisateur afin d'éviter les actions non désirées. Le fait d'être guidé par la forme a aussi été explicité lors de l'utilisation du creux formé entre 2 plis comme d'une « rainure » permettant de réaliser facilement un geste de glissé (Figure 92.b). D'autre part, nous avons remarqué que le fait de reposer la main sur la surface était également décrit comme un moyen de fournir une référence spatiale pour l'interaction : « *vous avez bien mis la main dessus, il faut quelque chose où ta main soit le référentiel* » (P1). Comme l'a dit un pilote : « *Je pose mes mains [sur la surface], si vraiment ça remue, je garde la précision... et puis je reste dans la matérialisation spatiale* » (P5) en dessinant un cercle autour de sa tête (Figure 92.c et d).

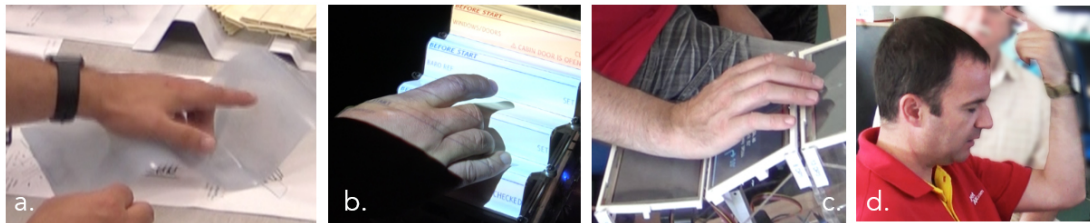


Figure 92. Discussions avec les pilotes concernant l'ergonomie des dispositifs *Multi-plié* : Stabilité de la main (a), (b) et (c) ; référence spatiale (d)

Concernant le couplage physique numérique, les cinq pilotes ont apprécié l'intégration de données numériques aux unités physiques des écrans du prototype 1 « *puisque là tu as la forme et l'image. Rien que ça tu as les deux* » (P1). On obtient ainsi un couplage profond, véhiculant l'illusion d'un même objet numérique et physique (Koleva et al., 2003). Certains pilotes ont fait un brainstorming sur l'expressivité tangible des plis avec les différentes maquettes : ils ont suggéré par exemple que leur hauteur indique une valeur, comme pour notifier une consommation de carburant inhabituelle entre deux points de cheminement, ou un changement de cap notable.

6.6.2 Adaptation aux besoins de l'activité, sensation et niveaux de contrôle pour un système critique

Au cours des ateliers, nous avons pu évaluer dans quelle mesure les pilotes ont adopté le concept *Multi-plié*. En effet, ces derniers ont pu manipuler les différentes maquettes et prototypes et discuter les propriétés du concept en utilisant un vocabulaire propre à leur activité.

Bien que la pertinence de la saillance par la forme pour les notifications soit déjà mentionnée dans la section précédente, il paraît intéressant d'examiner les

différents sens que les pilotes y ont projeté. Tout d'abord, un pli levé était pour tous les pilotes associé à quelque chose qui dysfonctionnait. Ceci est cohérent avec le concept de « *flat cockpit* », similaire au concept actuel de « *dark cockpit* » d'Airbus (tout est en ordre lorsque toutes les lumières sont éteintes). Ce concept de « *flat cockpit* » peut s'exprimer ainsi : quand tout est plat, sans saillance, tout se passe comme prévu et aucune action n'est nécessaire pour la phase de vol en cours. Ainsi, lors des ateliers, ce concept essentiel a été décliné dans une série de situations différents. Par exemple un pli levé pouvait représenter un événement inattendu à traiter, une anomalie dans les systèmes de l'avion, une « contrainte » à gérer, ou encore un rappel pour un élément oublié dans une procédure : « *par exemple tu commences ta descente, tu es en mode "descent", et tu n'as pas rempli les performances atterrissage : il y a un pli qui sort* » (P4). Cette différence de saillance a été décrite comme quelque chose qui change le niveau d'attention : « *dans le côté éveil de l'attention, ça change de configuration en terme de forme, donc nous ça nous pousse à changer de configuration en terme d'urgence, de niveau d'alerte* » (P5). Il s'agit alors de revenir à une situation normale avec une interface plate, comme l'a fait remarquer un pilote : « *c'est que de l'intérêt d'avoir du pli c'est de ... repasser ! [geste de repassage]. On aplatit* » (P5). Il est à noter que pour les pilotes, la mise en saillance ne s'apparente pas une à alarme : « *ça permet de mettre en surbrillance d'une manière autre qu'une alarme [le système] attends une action, mais qui n'est pas immédiate* » (P1).

Une autre série de commentaires à propos du concept se rapporte à la gestion d'actions ou de tâches de façon efficace et sûre. Ceci inclut la possibilité de dérouler des procédures de façon systématiques, comme dans le cas des check-list (scénario S4) et des séquences d'actions (scénario S5.b). Le concept offre dans ce cas une structure « *rythmique* » : comme l'explique ce pilote : « *il y a le côté systématique de la répétition, de la musique* » (P2). Plus simplement, les propriétés tangibles des plis disposés dans une structure répétitive et facilement appréhendable, permet d'effectuer des opérations rapides, simples et efficaces sans les yeux : « *je pense qu'on pourrait aller très vite (...) oui, clac, clac, clac... comme le système est très réactif* » (P4). D'autre part, imposer un geste physique comme pousser un pli pour effectuer une action « *ça augmente la sensation et la perception d'avoir fait l'action* » (P2), ce qui est important dans un travail parfois répétitif.

Le deuxième prototype (surface continue plissable) donnait également un fort sentiment de contrôle : « *c'est très vivant. Ça sert vraiment à piloter l'avion* », dans le sens de « *pilotage de la procédure* » (P5). D'autre part, pour garder le contrôle, les pilotes doivent se « positionner » (P2) et « savoir où ils se trouvent » (P3) afin de pouvoir reprendre une séquence d'actions interrompue, c'est ce qui est rendu possible par le pli physique qui n'est pas enfoncé tant que l'action correspondante n'est pas terminée. Les prototypes ont également inspiré la possibilité de « réserver » une action pour plus tard, de la même manière que les contrôleurs aériens qui prennent parfois un strip papier dans leur main pour se rappeler d'une action à réaliser (Mackay, 1999) : « *ça arrive parfois, fréquence chargée, ou quelque chose de plus important à faire. On priorise les actions* » (P2).

La structure par pli dispose en fait d'un espace de programmation riche, le fait de soulever manuellement un pli, par exemple en le pinçant, permet de coder des instructions. Il permet de programmer de manière réactive (chaque fois que l'on arrive à un point de passage : *<do something>*), de programmer une action à un moment précis par un pli : « *là [quand le pli apparaît] ça voudrait dire ah tiens ... Et en cliquant dessus "cabin crew 20 minutes"* » (P5) (actuellement effectué par le pilote en « créant un petit spot sur le plan de vol »). Par ailleurs, un pilote a souligné l'importance de cette capacité de programmation dans une activité temps réel : « *Ce [prototype] est une très bonne façon de matérialiser les actions qui vont être requises dans un futur proche, mais pas immédiatement. En fait tous ces systèmes, il y a une chose qui est primordiale, c'est le temps. On fait 10 km à la minute, le temps c'est le truc, tout joue avec le temps quoi* » (P1). Un autre pilote a expliqué en outre que c'est un moyen de différentier et de hiérarchiser les informations : « *c'est un séquenceur, ça te séquence les informations pertinentes en fonction de ta phase de vol* » (P4).

Par ailleurs, les séances d'exploration menées avec les pilotes ont permis de soulever un certain nombre de questions et de discussions liées à l'organisation de l'activité de pilotage et à la façon dont elle s'articule dans la structure physique du poste de pilotage. Les prototypes explorés offraient plusieurs directions pour réorganiser les affichages et les instruments, soit en permettant de combiner les systèmes, tels que l'unité de commande de vol (FCU), le système de gestion de vol (FMS), l'écran d'affichage des paramètres systèmes (ECAM) et la sacoche de vol électronique (EFB), soit en proposant plus de connexions entre les dispositifs. Cette plasticité du concept a permis d'envisager un certain nombre de redistributions des systèmes pour faciliter l'activité de pilotage. Tout d'abord, concernant l'obligation de privilégier une position tête haute (surveillance des systèmes et de l'environnement), les pilotes utilisaient la surface plissée en indirection, comme une télécommande sans les yeux ; ou exploraient comment remodeler la surface pour qu'elle puisse être disposée dans la zone permettant la vision tête haute (Figure 93). Les accoudoirs ont également été envisagés pour intégrer les prototypes, permettant ainsi de proposer une zone personnelle d'interaction facilement accessible. Un des pilotes a fait le lien avec les accoudoirs multifonctions des tracteurs agricoles.

Un autre aspect important du poste de pilotage réside dans sa structure collaborative nécessitant à la fois des espaces personnels propices à la préparation et à la réflexion et des espaces communs nécessaires à la concertation pour la décision. Dans ce contexte, les pilotes ont privilégié l'utilisation de deux dispositifs *Multi-plié*, un par pilote, mais tous deux disposés côte-à-côte dans une zone centrale commune. Par conséquent, ils ont imaginé à la fois un système de type FMS où chaque pilote peut consulter individuellement l'information relative au plan de vol et un système de type FCU où chaque action doit être accessible visuellement aux deux pilotes. Ce partage de l'état du dispositif permettrait d'améliorer la collaboration et dans certains cas de limiter la communication verbale : « *le système explique, ou montre, que l'autre a fait son taf et que maintenant c'est à toi. Que tu as juste besoin de confirmer... c'est le moment où on se*

retrouve » (P5). Cependant, le fait de permettre un changement d'inclinaison des écrans vers l'un ou l'autre des pilotes dans le premier prototype a été souligné comme un risque potentiel de scinder le cockpit et d'altérer la gestion des ressources de l'équipage. Enfin, en ce qui concerne la distribution spatiale de l'information, certains pilotes ont commenté positivement un prototype papier positionné transversalement entre les pilotes (Figure 84.b).

Les feedbacks haptiques vibrotactile générés par les oscillations rapides des écrans du prototype 1, et utilisés dans les scénarios S1.c et S3, a induit des réactions moins positives que les effets de la forme et du mouvement sur la perception. En effet dans un environnement où « *ça vibre de partout* », « *les petites vibrations tu les sens pas* » (P1). Ces remarques confirment les conclusions d'autres études sur l'utilisation des feedbacks haptiques par vibration dans les cockpits (Letondal et al., 2018).

6.6.3 Continuité

Continuité de la surface.

En comparant les deux prototypes, tous les pilotes sauf un ont préféré la surface continue du prototype 2, en disant par exemple que « *[ils] trouvent [la surface] presque rassurante, voire engageante* » (P4). Ils ont aimé « *ce principe de vague où tu as le doigt qui va pouvoir travailler sur toute la surface* » (P5) (Figure 91.b). Ils n'aimaient pas les espaces physiques générés entre les écrans du prototype 1 (notamment résultant des inclinaisons), expliquant que cela attirerait les miettes de pain et la poussière. Cependant, le pilote P1 a préféré le premier prototype pour sa segmentation nette et plus structurante. Ce pilote a également préféré les angles vifs et nets aux angles plus doux de la surface continue.

Plasticité et continuité entre les tâches.

Enfin, nous avons été frappés par l'intérêt des pilotes à pouvoir remodeler les plis à volonté, souvent inspirés par l'analogie de la « *vague* », comme l'a exprimé le pilote P2 : « *on pourrait inventer vraiment plier les vagues comme on veut !* ». L'un des pilotes (P5) a imaginé la possibilité de déplacer, par des mouvements amples, l'ensemble du prototype 1 d'un espace privé à un espace partagé propice à la collaboration (Figure 93.a et b).

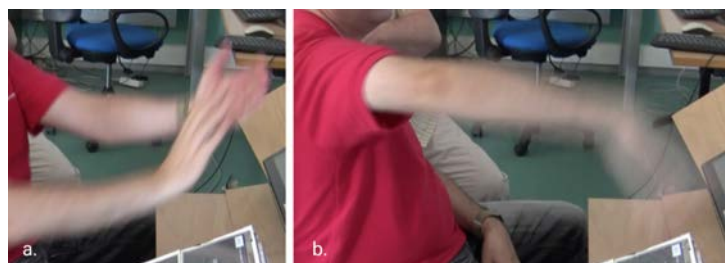


Figure 93. Idées d'interactions proposées par les pilotes : a) geste pour déplacer l'interface sur un espace partagé, b) geste pour ramener l'interface vers soi

Un autre pilote en se projetant dans un environnement physiquement modifiable a dit : « *on est dans l'imagination de trucs hyper mobiles, tu es toujours dans le redimensionner, la dynamique de l'interface* » (P4). En plus de pouvoir

être remodeler manuellement, les prototypes ont inspiré un pilote pour imaginer une interface qui s'adapte automatiquement aux phases de vol : « *Ça pourrait être automatique, une fois que tu lances l'approche, pof, le panneau passe en mode approche [avec] toutes sortes de plis* » (P4).

Interactions continues de transformation de la surface

L'espace de conception des interactions tactiles visant à modifier la forme a été exploré avec les pilotes sur les deux prototypes. Dans le premier prototype, nous avons conçu des menus tactiles pour comparer différents comportements et techniques d'interaction (slider position relative, slider position absolue, gestes, bouton plus et moins permettant de modifier l'inclinaison par pas de 2°). L'utilisation des boutons plus et moins (Figure 94.a) s'est avéré laborieuse et peu précise alors que la modification de l'inclinaison par le slider en fonction de la position relative du doigt par rapport au premier contact tactile (Figure 94.b) permettait de « maîtriser » efficacement la transformation de l'interface. Dans le second prototype, une zone tactile située au sommet de chaque pli permettait de l'aplatir comme s'il était physiquement enfoncé avec le doigt ; cette interaction écologique a été appréciée par les pilotes, même s'ils auraient préféré l'utilisation de capteurs réagissant à la pression pour avoir réellement la sensation d'enfoncer physiquement le pli.



Figure 94. Interactions proposées par le système pour agir sur les plis : a) réglage de l'inclinaison avec le slider position relative ; b) Utilisation du bouton + et - ; c) action tactile sur le sommet d'un pli pour le replier

6.7 SYNTHÈSE DU CONCEPT MULTI-PLIÉ

Le concept *Multi-plié* a été élaboré progressivement au travers des différentes étapes de la phase de conception des prototypes et des séances d'exploration avec les pilotes. Nous allons dans cette section résumer les propriétés du concept qui ont été à la fois la structure et le fruit de notre travail de conception.

6.7.1 Surface développable continue

Une première dimension du concept de design est qu'il s'agit d'une surface d'affichage interactive continue et développable. La création d'un pli ne crée pas un nouvel élément, le pli reste en continuité avec la surface, c'est donc la surface qui devient pli. Le pli est une saillance par rapport au reste de la surface, mais il fait toujours partie de la surface elle-même. On obtient donc une surface interactive toujours accessible visuellement et tactilement dans son ensemble, la continuité est préservée malgré la formation de plis. Les différents états de pliure du concept de l'accordéon vont de complètement étiré (100% plat) à

complètement comprimé (100% fermé). L'état complètement plat a été interprété par les pilotes comme la représentation d'une situation de stabilité ne nécessitant pas d'action sur le système.

6.7.2 Intelligibilité de la structure

Une autre dimension importante réside dans l'intelligibilité du fonctionnement du concept, qui découle de sa familiarité mais aussi de sa régularité. Les propriétés qui soutiennent cette régularité peuvent être décrites à deux niveaux : au niveau de la structure qui permet de générer des plis comme un ensemble cohérent, et au niveau du pli simple.

Structure de la série de plis.

La structure présente des contraintes qui la rendent plus prévisible qu'une surface pliable dans n'importe quelle direction. Ici, la structure est linéaire, les plis sont parallèles et les bords sont alignés. Il en résulte une structure qui offre une régularité perceptible comme une liste ou un ensemble d'éléments répétés dans une séquence ordonnée qui peut être parcourue par étapes. En formant un ou plusieurs plis alignés sur la surface flexible, le dispositif fournit un ensemble de variables visuelles similaires à celles définies par Bertin pour la sémiologie graphique (Bertin, 2013). Ici c'est la forme physique du pli, sa hauteur ou encore l'ampleur et la dynamique de son mouvement qui constituent des variables permettant de coder de l'information. Ce codage favorise l'utilisation de la perception pré-attentive garantissant ainsi une perception rapide (<250ms) et sans effort (Treisman and Gormican, 1988). Par ailleurs, cette structure répétitive et régulière formée par l'ensemble des plis favorise le déroulement d'actions séquentielles. Nous avons pu le confirmer au cours des explorations avec les pilotes qui par exemple structuraient une séquence d'actions autour d'un ensemble de plis ou déroulaient une check-list en suivant la structure des plis.

Structure d'un pli unique.

Un pli a une structure simple : lorsqu'il est relevé, un pli présente deux parties similaires : les faces avant et arrière ; lorsqu'il est abaissé, les deux faces fusionnent pour former une surface continue ; lorsque tous les plis voisins sont abaissés, les faces sont réintégrées dans une unique surface plane continue.

En fonction du point de vue le pli en position relevée présente une face partiellement occultée. Cette occlusion permet de révéler ou masquer de l'information en fonction du rôle ou du statut des opérateurs. Par exemple, si nous reprenons la disposition de la surface lors des explorations, la face arrière du pli occulté en position relevée peut être utilisée comme support ou guidage à l'interaction tactile alors que la face avant peut servir d'espace d'affichage. Désactiver le tactile sur les zones d'affichage non-interactives pour permettre de stabiliser la main a été jugé essentiel par les pilotes pour prévenir les actions non désirées. Lorsque la structure est placée transversalement (voir Figure 84) entre les 2 pilotes, la face d'un pli en position relevée peut proposer un affichage différencié, spécialisé en fonction du rôle de chacun des pilotes (PM ou PF).

6.7.3 Flexibilité du concept

En raison de son caractère générique, le concept présente un certain degré de flexibilité, c'est-à-dire qu'à partir de cette même idée de surface en accordéon on peut envisager de nombreuses déclinaisons de taille et de forme de plis. Cette flexibilité offre un grand espace de conception, sans pour autant réduire l'intelligibilité du concept.

Concernant la forme de la structure elle-même, les variations concernent principalement les angles, l'échelle, l'homogénéité des hauteurs et des longueurs des plis. Les angles peuvent être vifs ou ronds. Les angles arrondis permettent d'adoucir la structure des plis et assurer différents niveaux de continuité de surface. Une variation d'échelle produit différentes propriétés : de minuscules plis fournissent des états de surface (par ex. rugosité), tandis que de grands plis peuvent former une série d'écrans contenant des données riches. Perdant une partie de sa régularité, mais formant toujours un pli en accordéon, une surface donnée peut être plissée en plis de hauteurs ou de largeurs différentes, et les faces d'un pli donné peuvent avoir des dimensions différentes. La surface permet finalement des réarrangements dynamiques par pliage et dépliage, soit par le système, à différents rythmes, soit par l'utilisateur pour, par exemple, exprimer divers états du système ou pour communiquer entre pilotes.

6.7.4 Incarnation

La surface d'affichage interactive pliée en accordéon possède de bonnes propriétés liées à l'interaction incarnée. Tout d'abord, les propriétés liées au corps : la taille d'un pli peut s'adapter à la taille de la main, qui peut soit le saisir, soit s'y appuyer (phalanges ou paume). Alternativement, les plis peuvent s'adapter à la taille du bout du doigt, où un ensemble de plis très minuscules peut fournir une sensation haptique lorsqu'ils sont balayés avec le doigt. Par ailleurs, une structure entière pourrait correspondre à la taille du bras.

D'autre part, cette structure favorise les compétences incarnées acquises par la formation et nécessaire à la réalisation d'activités temps réel dans un contexte stressant et exigeant. Ces compétences incarnées permettent de développer une bonne connaissance de l'espace physique et du séquençement des actions. A cet égard, la régularité de l'ensemble des plis fondant le concept produit à la fois un support spatial de localisation et un cadre temporel pour des interactions séquentielles répétées. Ces aspects offrent une synthèse entre le corps du pilote et l'environnement instrumental de l'avion, déjà observé par (Letondal et al., 2018), c'est-à-dire une manière d'appréhender les dimensions des objets techniques comme une partie des dimensions perçues par le corps.

Enfin, un pli, perçu à la fois visuellement et « physiquement », peut être considéré non seulement comme une version tangible d'un élément de données, mais aussi comme capable d'exprimer physiquement les échanges de données entre les pilotes et les systèmes. Comme la surface est positionnée sur un plan incliné

central orienté vers les pilotes (Figure 85), soulever un pli déplace physiquement la surface vers eux. En conséquence, les données affichées sur un pli généré par le système sont ainsi « poussées » vers les pilotes pour alerter ou demander une action. D'autre part, un pli fait par un pilote s'apparenterait à « tirer » une partie de la surface vers lui pour « particulariser » ou marquer les données.

6.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté le concept *Multi-plié*, une surface tactile pliable à la manière d'un accordéon. A partir des problèmes d'utilisabilité des écrans tactiles des nouveaux systèmes avioniques, observés dans la section 2.5 et confirmés par l'approche théorique (chapitre 3), et plus particulièrement les problèmes de performances, conscience de la situation et collaboration, nous avons présenté un dispositif qui permet de « réincarner » l'interaction tactile.

Nous avons présenté la conception, la réalisation et l'évaluation qualitative de deux prototypes. Les trois axes de recherche définis dans l'introduction (*Activité oculaire, Sensation et niveau de Contrôle, Continuité*) ont structuré notre démarche et ont été utilisés pour analyser les résultats. Nous avons trouvé que la transformation de la surface produit des effets bénéfiques pour la perception visuelle ; en plus de favoriser la perception tactilo-proprio-kinesthésique. Le couplage de la forme de la surface d'affichage et du contenu permet de réduire la demande d'attention visuelle et d'améliorer la distribution de l'attention. D'autre part, nous avons confirmé que le concept d'une surface tactile pliable est adapté pour la gestion d'un système critique avec une forte division de l'attention visuelle.

Nous croyons que ce concept peut être généralisé à d'autres contextes avec une forte division de l'attention visuelle (conduite automobile, salle de contrôle, appareil tactile portable en mobilité). Néanmoins de nombreuses études restent à mener sur les mécanismes de transformation ainsi que sur les surfaces souples pliables et plissables.

Pour s'extraire du contexte d'étude et pouvoir généraliser la connaissance produite à d'autres environnements nous analyserons, dans le chapitre 7, les transformations topologiques des deux prototypes avec des outils théoriques du domaine de l'interaction homme-machine. Les données produites sont articulées avec les théories de la perception et de l'interaction incarnée (étudiées dans le chapitre 3) et servent de base pour proposer un espace de conception pour les interfaces tactiles reconfigurables utilisables dans un contexte d'activité avec une forte division de l'attention visuelle.

6.9 CONTRIBUTIONS

- Proposition d'un concept d'un écran tactile pliable à la manière d'un accordéon pour favoriser la collaboration et la conscience de la situation
- Conception et réalisation d'un dispositif composé d'écrans multiples « articulables » et intégration à une plateforme reproduisant l'environnement physique d'un cockpit de l'aviation commerciale

- *Conception et réalisation d'une surface d'affichage tactile « plissable » et intégration à une plateforme reproduisant l'environnement physique d'un cockpit de l'aviation commerciale*
- *Production de résultats qualitatifs (activité visuelle, niveau de contrôle, pertinence pour un système critique, continuité) sur l'utilisation des deux prototypes de surfaces tactiles reconfigurables*
- *Nous avons identifié que la transformation de la surface produit des effets bénéfiques pour la perception visuelle ; en plus de favoriser la perception tactilo-proprio-kinesthésique. Le couplage de la forme de la surface d'affichage et du contenu permet de réduire la demande d'attention visuelle et d'améliorer la distribution de l'attention. Nous avons confirmé que le concept d'une surface tactile pliable est adapté à la gestion d'un système critique avec une forte division de l'attention visuelle.*
- *Enrichissement de l'espace de conception s2s (présenté dans la section 7.3) et notamment les propriétés de « Couplage forme/contenu », « Surface d'interaction tactile continue » et « Rigidité souplesse »*

7 PROPOSITION D'UN ESPACE DE CONCEPTION DES SURFACES TACTILES RECONFIGURABLES

L'image numérique pointe notre attention vers une autre fonction d'interface fondamentale : celle qui est mise en place par notre propre corps.
(Hansen, 2006)

Les études présentées dans les deux chapitres précédents nous ont permis d'explorer la pertinence de nos prototypes de surfaces tactiles reconfigurables pour répondre aux exigences d'un système critique utilisable dans un contexte présentant une forte division de l'attention visuelle. Par ce travail nous avons commencé à caractériser les trois prototypes réalisés en fonction des effets produits par la transformation de la surface sur *l'activité oculaire*, la *sensation de niveau de contrôle pour un système critique (avec division de l'attention visuelle)* et la *continuité des interactions*. A partir de cette connaissance produite nous proposons dans cette partie d'analyser les spécificités et comportements de nos trois interfaces tactiles reconfigurables en utilisant les taxonomies existantes des interfaces à changements de forme. Nous utilisons le cadre de classification de

(Kim et al., 2018) basé sur le travail de (Roudaut et al., 2013) qui propose l'utilisation d'un modèle géométrique NURBS (Non-Uniform Rational Basis Splines) pour définir 10 métriques et celui de (Rasmussen et al., 2012) qui caractérise 8 types de transformation. Nous utilisons les résultats de cette caractérisation des propriétés physiques de transformation ainsi que les données issues du travail d'état de l'art et d'analyse de l'activité sur la place du corps dans la tâche de pilotage pour questionner les effets de la transformation de la surface tactile sur les modalités de perception et d'action. Nous présentons ensuite les principes d'un espace de conception pour les interfaces tactiles reconfigurables utilisables dans un contexte d'activité avec une forte division de l'attention visuelle (que nous appellerons *s2s* dans la suite de ce document). Par cet espace de caractérisation nous cherchons à proposer une traduction des modalités d'actions/perceptions sur la surface par des propriétés physiques d'états ou de transformation de la surface interactive. Pour terminer, nous revenons sur l'objectif initial de transformer la surface tactile pour réincarner l'interaction et nous interrogeons notre espace de conception dans sa capacité à supporter une telle ambition.

7.1 LES TAXONOMIES SUR LES INTERFACES RECONFIGURABLE

Dans le champ des interfaces reconfigurables (Kim et al., 2018), appelées aussi « *malleables* » (Koh et al., 2010) (Wikström et al., 2013), « *deformable* » ou « *shape-changing* », de nombreuses taxonomies ont été proposées. Les premières comme, par exemple, celle de (Coelho and Zigelbaum, 2011) se sont intéressées aux propriétés des matériaux et à leurs effets sur la conception et sur le comportement des interfaces reconfigurables. Dans cette taxonomie, les auteurs identifient, des propriétés comme la « Résistance à la déformation et puissance requise » ou de « Vitesse et résolution » pour analyser les caractéristiques des matériaux programmables comme les « polymères à mémoire de forme » ou les « céramiques piézoélectrique ». En plus de cette première approche centrée sur les technologies de transformation, les auteurs proposent une caractérisation des transformations d'une surface en objet d'interaction. Ils spécifient 3 types de transformation : « Les transformations topologiques » (modification de la courbure de la surface globale), « Les transformations de texture » (modification parcellaire sans affecter le forme globale) et « Les transformations perméables » (modification de la porosité ou de la transparence). Ces 3 types de transformation, intéressantes dans le cadre de notre recherche par leur questionnement de la surface, sont reprises en partie dans la taxonomie de (Rasmussen et al., 2012) basée sur une revue de 44 travaux de recherche sur des interfaces reconfigurables. Les auteurs identifient en tout 8 types de changement de forme : orientation, forme, volume, texture, viscosité, spatialité, assembler/diviser, et perméabilité (

Figure 95) et 4 paramètres de transformation (vitesse, chemin, direction et espace).

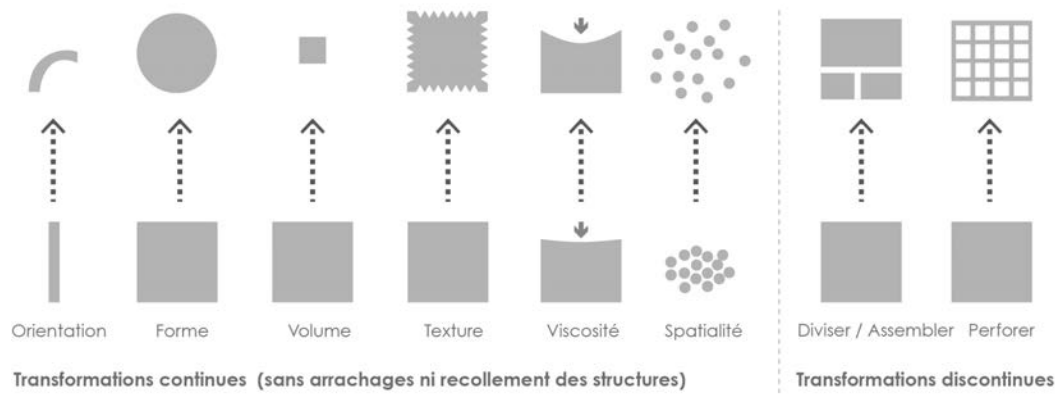


Figure 95. Les 8 types de transformation de la taxonomie de (Rasmussen et al., 2012)

(Roudaut et al., 2013) utilisent le modèle géométrique NURBS (*Non-Uniform Rational Basis Splines*) pour décrire les topographies des dispositifs déformables et proposent le terme de « *shape resolution* » qui étend la définition de résolution d'affichage aux interfaces à changement de forme. A partir de l'étude des déformations d'une surface composée d'un maillage de point de contrôles ils ont défini des paramètres tels que *Area*, *Granularity*, *Porosity*, *Curvature*, *Amplitude*, *Zero-Crossing*, *Closure*, *Stretchability*, *Strength*, *Speed* (Figure 96) pour décrire les formes et les processus de transformation des interfaces. Le choix du modèle NURBS, utilisé en CAO pour le design de forme libre, est justifié par sa capacité à offrir, d'une part, une métrique précise et uniforme pour calculer la valeur des caractéristiques de déformation des interfaces et d'autre part, à favoriser l'exploration d'un espace conceptuel ne se limitant pas aux technologies ou matériaux existants. (Kim et al., 2018) utilisent cette taxonomie ainsi que celle de (Rasmussen et al., 2012) pour réaliser une analyse systématique de 82 objets reconfigurables du quotidien (un trombone, un mixeur, un livre, etc.). Les auteurs ont cherché à évaluer la pertinence des deux taxonomies pour caractériser des objets existants, ce qui leur a permis d'identifier des propriétés redondantes ou incomplètes. Ce travail a abouti à la proposition d'une version mise à jour de la taxonomie de (Roudaut et al., 2013) par l'ajout de la propriété *Modularity* et la redéfinition de la propriété *Area* en *Size* (Figure 96).

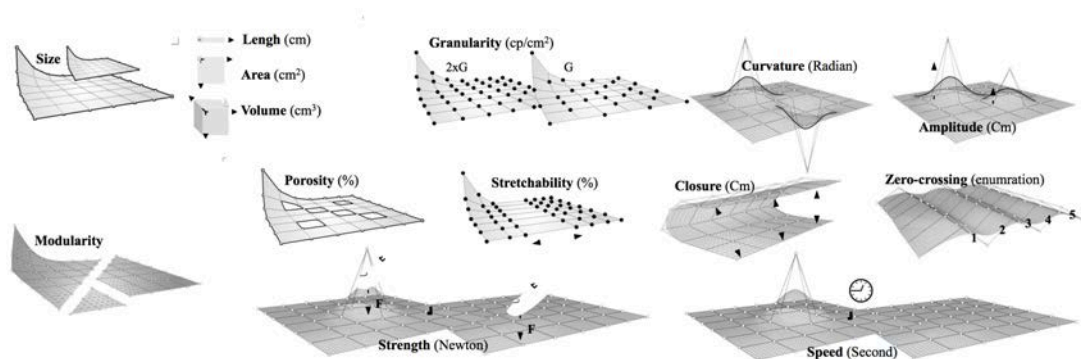


Figure 96. Les caractéristiques de la taxonomie de (Roudaut et al., 2013) mis à jour par (Kim et al., 2018)

Cette taxonomie étant largement utilisée et reconnue dans le champ des interfaces reconfigurables, nous avons décidé de l'utiliser pour caractériser les transformations topologiques des trois prototypes présentés précédemment.

7.2 ANALYSE DES TRANSFORMATIONS TOPOLOGIQUES DES PROTOTYPES

Les transformations topologiques possibles des prototypes utilisés dans les études *GazeForm* (chapitre 5) et *Multi-plié* (chapitre 6), ont été évaluées suivant les 10 caractéristiques de la taxonomie de (Kim et al., 2018). Pour chaque prototype, nous avons apprécié la capacité de réaliser une propriété sur une échelle de 1 à 4 et nous avons représenté dans la (Figure 97) cette notation en disposant des carrés de couleurs, pour chaque prototype, sur un axe horizontal séparé en 4 colonnes ; l'échelle, pour les propriétés qui expriment une capacité va de ce comportement est : *impossible* – *en partie possible* – *possible* – *complètement possible* ; pour les propriétés qui expriment une donnée numérique (temps en seconde, quantité, force, etc.) l'échelle est à considérer de 0 à 4 par rapport à des bornes fixées par les caractéristiques des interfaces reconfigurables connues. Pour certaines propriétés et afin de réaliser une analyse plus fine, nous avons complété cette première approche avec des données chiffrées sur les transformations. Dans la suite de cette partie, nous décrivons pour chaque propriété ses spécificités, ses applications dans les prototypes *GazeForm* et *Multi-plié*, les conséquences pour l'interaction et nous terminons par une proposition de recommandations.

Size

La propriété *Size* regroupe 3 changements possibles de mesure de l'enveloppe convexe (le plus petit polygone convexe contenant tous les points limites de la forme) représentée en rouge dans la Figure 98 ou en bleu dans la Figure 99 : la longueur (longueur du polygone en cm), la surface (surface du polygone en cm²) et le volume (volume de l'objet en cm³) (Figure 96).

Pour le prototype *GazeForm*, la modification de la longueur du bouton rotatif par son émergence de 2.5 cm fait varier le volume global de l'interface. En passant d'une surface plate avec un volume presque nul (si on tient compte de l'épaisseur de la plaque de PMMA) à un volume de 60 cm³ avec un bouton déployé (l'interface était utilisée avec un seul bouton émergé) le dispositif produit une transformation de volume de 600%. Cette variation importante permet de passer d'une surface plane à un bouton saisissable et manipulable ergonomiquement proportionnée à la taille de la main.

Le prototype *Multi-plié*, série d'écrans articulés (que nous appellerons *Multi-plié* P1) offre par la modification de l'inclinaison des écrans une variation du volume, de la longueur et de la surface du dispositif. Par rapport à la position alignée des écrans (position neutre), la transformation de volume peut se faire vers le haut ou vers le bas. Entre la position neutre et la position haute ou basse le volume de l'ensemble est multiplié par 100. La longueur et la surface du

dispositif augmentent avec l'apparition d'espacement entre les écrans lors de l'inclinaison. Ces espaces physiques entre les surfaces d'interactions ont été perçus par les pilotes comme des « nids à poussières » ou des zones de pincement et ce d'autant plus que dans les scénarios ils ne permettaient pas d'interactions supplémentaires. Par contre, l'ajout d'une membrane élastique de liaison entre les écrans a été proposé par l'un des pilotes pour pouvoir réaliser des interactions d'aplatissement d'un pli par pression.

Taxonomie de Kim et al.

Size

capacité de changement de taille des objets (longueur, surface et volume de l'enveloppe convexe de la surface NURBS)

Modularity

capacité d'un objet à être divisé en plusieurs parties et à se recomposer tout en conservant sa fonctionnalité originale.

Granularity

densité des points d'actionnement physiques

Porosity

rapport entre la surface des parties perforées et la surface totale de la forme

Curvature

décrit la courbure de la surface, elle est calculée en supprimant π de l'angle entre 3 points de contrôle consécutifs

Amplitude

décrit la plage de déplacement des points de contrôle, calculée comme la distance entre la position stable et la position actionnée d'un point sur la surface

Zero-Crossing (M.Zero-Crossing)

est le nombre de changements de signe entre une paire d'angles consécutifs sur la surface (capacité d'une forme à avoir des formes ondulées).

Closure (M.Closure)

décrit le degré de « fermeture » d'une forme, calculé comme étant $100 \times (\text{Surface} - \text{Surface entre les bords})$ où la Surface entre les bords est la surface de la forme créée à l'aide des points de contrôle situés sur les bords de la surface

Stretchability (M.Stretchability)

décrit à quel point la surface se déforme entre deux points de contrôle

Strength (M.Strength)

est la force nécessaire pour déplacer un point de contrôle de la position d'amplitude minimale à la position d'amplitude maximale de la forme.

Speed (M.Speed)

est le temps nécessaire pour déplacer un point de contrôle de la position de repos à la position d'amplitude maximale de la forme sous l'effet de l'actuation automatique

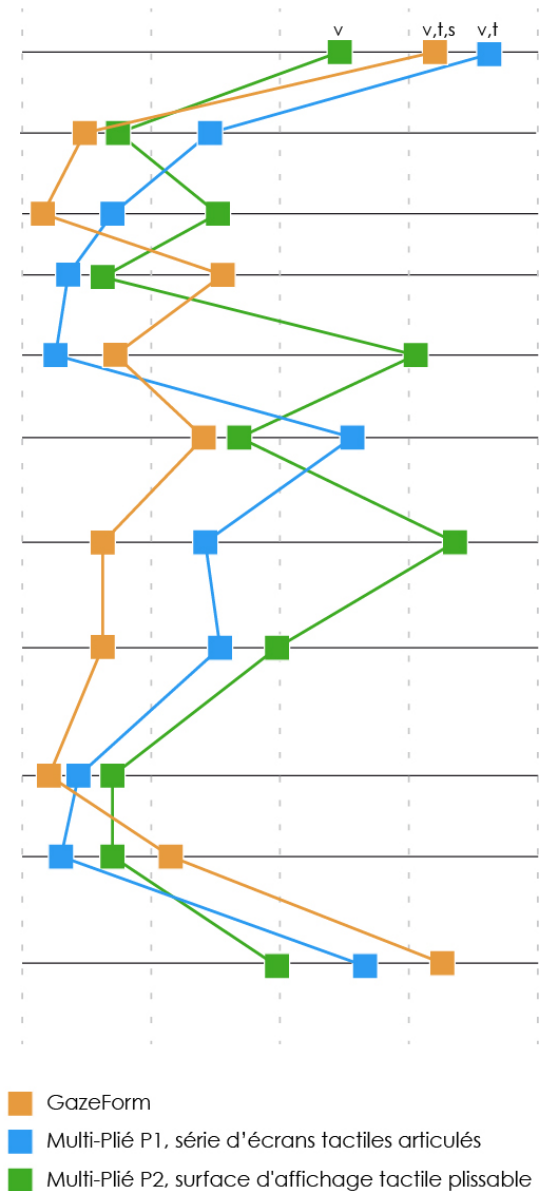


Figure 97. Caractérisation des prototypes *GazeForm*, *Multi-plié* P1 et P2 par rapport à la taxonomie de (Kim et al., 2018)

Le prototype *Multi-plié* P2 avec sa surface d'affichage tactile continue et « plissable » permet de résoudre ces problèmes liés à l'apparition d'interstices entre les surfaces d'affichages. Le dispositif change de volume sans changer de taille ni de longueur. La surface par compression est pliée sans être ni rétrécie ni

allongée ; entre la position basse (neutre) et l'état complètement plissé (4 plis) le volume du dispositif est multiplié par 80 (Figure 98). Le changement important de volume, comme pour les autres prototypes, est nécessaire pour rendre la transformation visible et utilisable (guider l'action et/ou stabiliser la main). Des états intermédiaires de transformation produisant des modifications de volume divisé par 2 n'étaient pas perçus par les pilotes. Dans cette première version du prototype l'espace vide créé sur la partie supérieure du dispositif dans l'état plissé n'a pas été traité ; comme pour *Multi-plié* P1 l'ajout d'une membrane élastique pourrait permettre de combler les espaces créés par le pliage par compression d'un matériaux solide et souple.

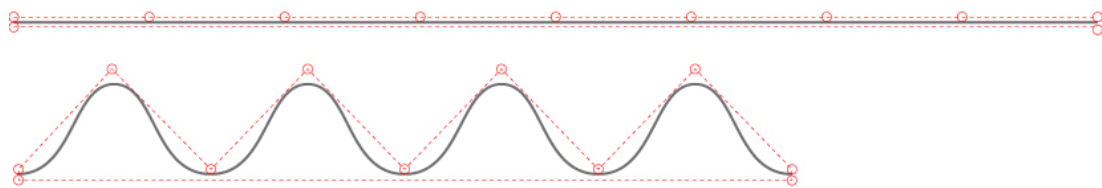


Figure 98. Vue de profil de la transformation de taille du prototype *Multi-plié* P2

Recommandations liées à l'utilisation de la propriété *Size*

- *Produire des variations de taille (volume, longueur et surface) permettant de favoriser l'accessibilité des objets manipulables et la perception des affordances physiques*
- *Garantir une continuité de la surface durant les transformations de taille*

Modularity

La modularité est calculée comme le nombre de combinaisons fonctionnellement possibles (Cpossible) de k pièces parmi n pièces disponibles au total (Figure 96). La modularité est définie pour les objets qui peuvent être divisés en au moins deux parties ($n > 1$).

Aucun des trois prototypes ne propose la caractéristique de modularité, au sens de pouvoir attacher ou détacher un élément de l'ensemble, de façon dynamique. Cependant, le prototype *Multi-plié* P1 est composé de 2 modules de 2 écrans identiques qui peuvent être re-disposé manuellement. Ce fonctionnement par module a été privilégié pour permettre l'évaluation du système dans différentes configurations : placée transversalement entre les pilotes, la face relevée d'un pli propose un affichage spécialisé en fonction de la position et du rôle des pilotes. Par exemple, face aux pilotes avec les plis perpendiculaires à l'axe de l'avion les faces relevées permettent de manipuler des informations partagées. Plus généralement, la modularité est un principe fondateur du concept *Multi-plié*. Le pli unique avec sa structure simple à 2 faces est un module pouvant être associé pour composer une structure sérielle qui par son caractère répétitif et régulier offre une intelligibilité¹⁰ du fonctionnement du dispositif.

¹⁰ Qui est aisé à comprendre [littre.org]. Nous l'utilisons pour décrire une surface qui donne à voir ses transformations possibles. L'utilisateur peut en comprendre aisément les différents états de forme et les actions possibles de transformation.

Recommandations liées à l'utilisation de la propriété *Modularity*

- *Favoriser la modularité pour produire des déclinaisons d'usages et d'accessibilité*

Granularity

Cette caractéristique mesure la densité de point d'actuation (point de transformation physique de la surface) par rapport à la surface totale du dispositif, elle s'exprime en cp/cm² (Figure 96). Le prototype *GazeForm* offre 3 points d'actuation (1 par bouton) sur une surface de 16*20 cm ce qui fait une densité de 0.006 cp/cm² (Figure 97). Comparativement aux 2.4 cp/cm² du projet Lumen (Poupyrev et al., 2004), *GazeForm* possède une densité faible traduisant des possibilités de transformations réduites. Pour *Multi-plié* P1 et *Multi-plié* P2 la densité est respectivement de 0.012 cp/cm² et 0.057 cp/cm². Les faibles densités utilisées dans les trois prototypes permettent de produire des comportements facilement appréhendables, ce qui a plutôt été jugé positivement par les pilotes lors des évaluations. Une augmentation dynamique de la granularité avec l'activation/désactivation de points de contrôle permettrait, dans le cas des prototypes *Multi-plié*, de faire varier les angles des plis (vifs ou ronds), la taille des plis (minuscules pour fournir un état de surface ou grands pour offrir un support d'appui ou afficher des données riches), le rythme de disposition des plis. Même si nos prototypes cartons exprimaient cette variation d'échelle de transformation, par absence de solution technique implémentable nous n'avons pas pu l'intégrer aux prototypes finaux.

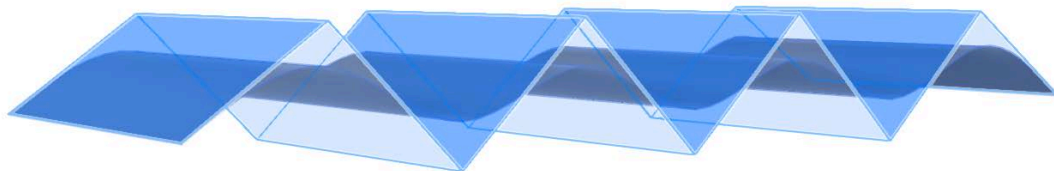


Figure 99. Vue CAO avec des faces NURBS du prototype *Multi-plié* P2

Recommandations liées à l'utilisation de la propriété *Granularity*

- *Une forte densité de points d'actuation de la surface peut nuire à l'intelligibilité du fonctionnement du dispositif.*
- *L'utilisation d'une densité variable de points de modification peut permettre de réaliser des transformations d'une même structure suivant différents niveaux d'échelle.*
- *La densité de points de contrôle permet de favoriser le couplage des données numériques avec les transformations physiques.*

Porosity

La porosité est le rapport de la surface des parties perforées par rapport à la surface totale de la forme (Figure 96). La porosité peut donc être calculée à l'aide de la formule suivante : $100 \times (\Sigma \text{ trous} / \text{Surface})$. Le changement de porosité ne peut pas résulter d'une déformation continue de la forme originale, il doit être

fait par une perforation que l'on vient obstruer. C'est le cas pour le prototype *GazeForm*, la surface a été découpé préalablement au laser et le bouton rotatif vient obstruer cette ouverture. Pour l'expérimentation contrôlée nous n'avons pas évalué la création de forme en creux par rétractation du bouton. Cependant, durant la phase de conception, nous avons imaginé la possibilité de guider le doigt pour le réglage par la forme circulaire en creux de la perforation. Le principe est de ne plus être guidé par la forme qui émerge sur le fond (le bouton rotatif qui sort de la surface) mais de transformer le fond en forme en créant une aspérité, un trou dans la surface. Ce comportement pourrait éventuellement permettre de mieux faire cohabiter l'image affichée avec la forme de guidage : le fond surface d'affichage peut devenir forme tout en restant le fond. Comme avec le prototype *Multi-plié* P2 où le plissage de la surface (du fond) permet de créer de la forme tout en gardant sa fonction, son essence de fond de support d'affichage. Ainsi la surface est à la fois fond et figure : c'est le fond qui en se pliant devient figure tout en restant surface. L'étude des effets sur la perception d'un tel comportement pourrait faire l'objet de travaux futurs.

Recommandations liées à l'utilisation de la propriété *Porosity*

- *Utiliser la perforation de la surface pour transformer le fond support d'affichage en forme favorisant l'action physique tout en maintenant sa fonction de surface écran.*

Curvature

La propriété *curvature* décrit le degré de courbure de la surface. Cette propriété est positive pour les formes convexes, négative pour les formes concaves et nulle pour les surfaces planes (Figure 96). Elle est calculée en déduisant π de l'angle entre 3 points de contrôle consécutifs. La modification de courbure peut être générée par une action manuelle comme par exemple avec le dispositif Gummi (Schwesig et al., 2003) utilisant un écran tactile flexible, ou Paperphone (Lahey et al., 2011) proposant une déformation d'écrans souples *E-ink* par manipulation. Elle peut aussi être générée de façon dynamique comme avec le prototype *Multi-plié* P2 qui par « plissage » de la surface permet une modification de la courbure d'un pli en passant d'un état plat à une forme concave pour le pli en sailli et convexe pour le pli en creux. Dans ce cas ce n'est pas une modification de courbure de l'ensemble du dispositif qui est proposée mais de chaque pli composant la surface. Lors de l'évaluation les pilotes ont souligné le côté « engageant » pour l'action de la forme concave ; pour supporter une action tactile, stabiliser la main (forme se logeant dans le creux de la main) ou appuyer dessus pour ré-aplatir, comme pour « remettre à plat » une situation après la réalisation d'une procédure. Un des pilote (P5) a exprimé le désir de modifier le degré de courbure d'un pli pour modifier un paramètre de réglage en pinçant pour « déformer la matière ». Enfin, la variation de degré de courbure entre les plis était perçue comme un codage de différents niveaux d'urgence de traitement ou encore une représentation des liens de dépendance dans une liste (élément/sous élément d'une liste). Pour ce prototype, le degré de courbure maximum ($\pi/4$)

était déterminé par la résistance mécanique de la couche de 2mm de PLA imprimée.

Recommandations liées à l'utilisation de la propriété *Curvature*

- *Utiliser la courbure pour favoriser l'accessibilité et la perception écologique des affordances (support/guide d'une action tactile, plier/aplatir la surface, etc.).*
- *Améliorer le couplage (numérique/physique) en utilisant la différence de courbure d'une série de formes pour coder de l'information*

Amplitude

L'amplitude décrit la plage de déplacement des points de contrôle. C'est la distance parcourue par un point de contrôle entre la position neutre et la position actionnée, elle est exprimée en cm (Figure 96). Pour le prototype *GazeForm*, l'amplitude des points de contrôles des boutons est de 2,5 cm ; elle favorise la prise en main du rotateur. Des tests avaient été réalisés avec des amplitudes inférieures mais la prise en main « du bout des doigts » ne permettait pas d'avoir un contrôle fin du réglage. Le bouton est saisi par les doigts mais sert aussi de reposoir à la paume de la main, l'amplitude est ergonomiquement déterminée par les dimensions de la main saisissante. Pour le prototype *Multi-plié* P1, l'amplitude des points de contrôle des sommets mobiles est de 8 cm (+4 et -4 par rapport à la position neutre) ; comme pour la propriété volume, la forte amplitude permet d'offrir des opportunités à l'action (reposoir, guidage) et favorise la perception (orientation pour révéler, masquer, partager). En ce qui concerne le prototype *Multi-plié* P2, l'amplitude est moindre, elle varie entre 0 et 3 cm. Une amplitude trop faible ne permet pas de discriminer la forme de la surface : les pilotes ont exprimé des difficultés pour percevoir visuellement des différences entre les plis complets (3 cm) et les demis plis (1,5 cm). Dans le cadre de l'étude *Multi-plié* nous n'avons pas exploré la discrimination de l'amplitude en utilisant uniquement le système haptique, cette approche pourra faire l'objet de travaux futurs.

Recommandations liées à l'utilisation de la propriété *Amplitude*

- *Adapter l'amplitude de la transformation pour rendre perceptible par la vision et le toucher (système haptique) les transformations ou les états. Améliorer l'accessibilité par l'amplitude.*

Zero-Crossing

La propriété *Zero-Crossing* décrit la capacité d'une forme à produire des ondulations ; elle représente le nombre de changements de signes entre chaque paire d'angles consécutifs sur la surface (Figure 96). D'après (Kim et al., 2018). Cette propriété a été peu étudiée dans le champ des interfaces à changement de forme si ce n'est par (Harrison and Hudson, 2009) avec la déformation en bosse ou en creux d'une surface tactile, ou par (Paik et al., 2011) par le pliage d'une structure en utilisant l'art de l'origami. C'est, en revanche, une propriété essentielle des deux prototypes *Multi-plié*, qui par inclinaison d'écrans ou plissage de la surface permettent la génération et la modification d'une forme ondulée : une forme qui est simplement produite par une déformation du fond, une création d'aspérité

dans le fond sans découpe ni recouvrement. Ainsi la surface est à la fois fond et figure : c'est le fond qui en se pliant devient figure, mais en restant surface quand même.

Alors que pour la version P1, la forme ondulée est limitée au repositionnement de 2 sommets mobiles (avec un zero-crossing égal à 2), pour la version P2 la liberté de modification de l'ondulation est autorisée par 4 points de contrôle différents. Durant les évaluations, inspirés par l'analogie de la « vague », les pilotes ont manifesté l'envie de remodeler à volonté cette ondulation « *on pourrait inventer [...] vraiment plier les vagues comme on veut !* » P2. C'est à la fois une forme qui incite à la transformation physique (plasticité par manipulation) mais qui par son caractère répétitif et sériel facilite aussi la perception des dépendances, des enchainements et des comparaisons. Par ailleurs, les pilotes ont aimé la continuité de surface de la forme ondulée : « *ce principe de vague où tu as le doigt qui va pouvoir travailler sur toute la surface* » (P5). Enfin, nous avons observé que le simple fait de produire une ondulation sur une surface plane affichant une image permettait de favoriser la perception de la profondeur et de mettre les éléments en perspective. Vus sous certaines angles, les sommets des surfaces visibles ainsi que les bords occluants (masquage de la face arrière du pli) mettent en évidence des invariants dans la structure du champs optique (**Figure 100**) qui favorisent la perception des affordances et de la profondeur (Gibson, 1979).

Recommandations liées à l'utilisation de la propriété *Zero-Crossing*

- *Utiliser la forme ondulée et la modification du rapport topologique entre les surfaces pour favoriser la perception des affordances.*
- *Produire de la forme en conservant la continuité de la surface d'interaction.*

Closure

La fermeture décrit à quel point une forme est fermée. Elle se calcule en déduisant la surface des limites (surface calculée entre les points de contrôles des bords se refermant) à la surface totale (Figure 96). Nous retrouvons cette caractéristique uniquement dans le prototype *Multi-plié* P2 ; l'indice de fermeture d'un pli et des plis entre eux est dynamiquement variable. Sa variation a été utilisée pour accueillir l'action et guider le geste tactile, proposer une « rainure » pour réaliser un geste de glissé. Comme avec la caractéristique *curvature*, plus un pli présente une forme fermée et plus il est différenciable du reste de la surface. Ainsi, il peut être utilisé pour programmer une action comme un « reminder », ou « séquencer » des actions (P4). Le niveau de fermeture des plis a été déterminé par les limites acceptables de pliage du matériau mais aussi par des impératifs ergonomiques (permettre le passage du doigt entre les plis) et perceptifs (discrimination des plis entre eux).

Recommandations liées à l'utilisation de la propriété *Closure*

- *La variation de fermeture d'une forme par rapport son état plat peut favoriser le codage d'informations numériques pour la comparaison ou la différenciation et améliorer le couplage numérique/physique.*

Stretchability

L'extensibilité décrit à quel point la surface se déforme entre deux points de contrôle ; elle indique la distance d'étirement ou de compression. Pour les 3 prototypes, la propriété *Stretchability* est fixe à 0%. L'utilisation de matériaux solides non élastiques (PMMA, écrans tactiles ou PLA imprimé) ne permettent pas l'étirement ou la compression. Nous avons privilégié l'utilisation d'un matériau rigide pour supporter la modalité tactile, offrir un dispositif résistant aux appuis des doigts et supportant les contraintes d'un usage en contexte dynamique (turbulence et vibration). L'utilisation d'un matériau offrant une élasticité programmable, comme le fluide magnéto-rhéologique utilisé dans le projet MudPad de (Jansen et al., 2010), serait une alternative intéressante pour répondre aux exigences et bénéficier d'une liberté de transformation plus importante.

Recommandations liées à l'utilisation de la propriété *Stretchability*

- *L'extensibilité de la surface ne favorise pas le support de l'action tactile*
- *L'extensibilité programmable peut améliorer la transformabilité tout en garantissant l'accessibilité. Elle peut aussi améliorer le couplage numérique/physique et geste/forme.*

Strength

La propriété *Strength* est la force nécessaire pour déplacer un point de contrôle de la position d'amplitude minimale à la position d'amplitude maximale de la forme, ou inversement. Cette caractéristique est utilisée depuis longtemps dans les dispositifs haptiques par la production dynamique d'une force à niveau variable pour fournir un feedback. Cette force peut par exemple être utilisée pour améliorer le sentiment de contrôle d'un réglage de température sur un thermostat (van Oosterhout et al., 2018).

Le prototype *GazeForm* n'utilise pas la propriété *Strength* à proprement parler, cependant le fait de pouvoir rentrer le bouton par appuie physique sur son sommet a été un moyen de simuler ce comportement. La force exercée ne produit pas directement la modification de l'état d'émergence mais active le mécanisme motorisé de déplacement des boutons. Le niveau de force attendu pour déclencher le changement d'état a été compris et apprécié par les pilotes. La résistance en début de course puis le clic émis en fin d'enfoncement (comme un clic de souris) a été compris comme le déclenchement d'un mécanisme motorisé. Un des pilotes aurait préféré un couplage plus fin entre la force émise et le niveau de déplacement du bouton. D'autre part, durant la phase de conception, l'utilisation d'un système de retour de force dans la rotation du bouton pour indiquer une approche de cible a été imaginé ; ce type de feedback pourra être intégré dans des évolutions possibles du dispositif *GazeForm*.

Pour *Multi-plié* aucun des deux prototypes n'intègre cette propriété. Néanmoins de nombreux commentaires de pilotes explicitent le désir de pouvoir enfoncer des plis et d'avoir la sensation de déformer physiquement la matière. Nous avons pensé à utiliser un capteur de pression intégré à la surface pour asservir le déplacement des moteurs à la force de l'appui, mais l'implémentation n'a pas

été possible pour l'évaluation ; un tel ajout pourrait faire l'objet de travaux ultérieurs.

Les recommandations liées à l'utilisation de la propriété *Strength*

- *Utiliser la dynamique du feedback de force pour favoriser le couplage entre le geste de déformation et la modification de la forme*
- *Augmenter la sensation de contrôle en produisant une force de résistance à la manipulation de déformation.*

Speed

La vitesse est le temps nécessaire pour déplacer un point de contrôle de la position de repos à la position d'amplitude maximale. Elle concerne uniquement les dispositifs reconfigurables dynamiquement et est exprimée en secondes. Elle peut être considérée, à l'image du fonctionnement des écrans, comme le taux de rafraîchissement d'une forme (Kim et al., 2018). Pour le prototype *GazeForm*, la propriété *Speed* pour une sortie totale du bouton était de 1,25s en utilisant la vitesse maximale des servomoteurs (20mm/s). Différents tests de modification de vitesse ont été réalisés (ajout d'un temps de latence pour déclencher la transformation ou diminution de la vitesse des moteurs) durant la phase d'exploration avec les pilotes mais à chaque fois le système a été perçu comme moins réactif. Le bouton « arrivait » trop tard dans la main, ou gênait la lisibilité de l'affichage en restant émergé.

Le passage de la surface plane à l'état plis levés se fait respectivement, en 1.25 secondes pour le prototype *Multi-plié* P1 et 1.03 secondes pour le prototype *Multi-plié* P2. Ce temps de transformation était limité par la vitesse de déplacement des moteurs (actuateurs linéaires). Pour le prototype P2, nous avons pu évaluer le contrôle de la vitesse lors de la transformation par une interface dédiée ; les pilotes ont majoritairement préféré une vitesse de transformation qui était couplé à la vitesse de déplacement du doigt sur l'interface de contrôle.

Les recommandations liées à l'utilisation de la propriété *Speed*

- *Optimiser la vitesse pour améliorer le couplage forme/contexte et forme/geste.*
- *Minimiser les délais et la latence lors des transformations*

Ce travail de caractérisation des transformations topologiques des prototypes a été l'occasion de spécifier des recommandations sur la mise en œuvre des propriétés de la taxonomie de (Kim et al., 2018). Nous utilisons ces résultats pour préciser les caractéristiques de l'espace de conception pour les surfaces tactiles reconfigurable, présentées dans la section suivante.

7.3 S2S, UN ESPACE DE CONCEPTION POUR LES SURFACES TACTILES RECONFIGURABLES

A partir des données issues de l'analyse de l'activité (chapitre 2), du cadre théorique (chapitre 3), des résultats des évaluations des prototypes *GazeForm* (chapitre 5) et *Multi-plié* (chapitre 6) et de la caractérisation des déformations

topologiques de la section précédente, nous allons dans la suite de cette partie détailler les principes de design d'un espace de conception pour les interfaces tactiles reconfigurables (Figure 101). Après une approche de caractérisation des déformations topologiques en fonction des propriétés physiques de transformation d'un dispositif nous nous sommes intéressés aux effets des transformations sur les modalités d'actions/perceptions dans un contexte d'activité avec une forte division de l'attention visuelle (entre, par exemple, une tâche de réglage par interaction tactile et une tâche de surveillance visuelle). Nous avons traduit ces effets en propriétés, qui pourront être utilisées pour la conception et l'évaluations de dispositifs comportant des surfaces tactiles reconfigurables. Inspiré par le travail de (Coutaz et al., 2002), présenté à la section 3.1.3.2, sur la définition d'une ontologie des surfaces interactives, nous avons repris les propriétés d'*Homogénéité/hétérogénéité*, *Rigidité/souplesse*, et *Accessibilité* qui permettent de décrire les capacités de transformation de la surface (approche topologique) répondant aux exigences du domaine d'activité de notre étude. Nous avons enrichi la définition de ces propriétés avec des éléments de l'analyse de l'activité et de l'état de l'art. Par ailleurs, nous avons complété le cadre de conception avec la propriété de *Couplage* issue du travail de (Bucher and Chatty, 2009) sur l'évolution des surfaces d'affichage (fenêtre et dispositifs physiques) et de la littérature scientifique sur les interactions incarnées, les interfaces tangibles (TUI) et les interactions tangibles (section 3.2.2). Ce principe, central dans notre approche, comprend bien sûr le couplage entre les données numériques et la forme de l'interface que nous retrouvons dans le champ des interactions tangibles, mais aussi les couplages affichage-2D/forme, Geste/forme, Contexte/forme, etc. Enfin, la propriété Statique/dynamique inspirée par les taxonomies sur les interfaces reconfigurables (Coelho and Zigelbaum, 2011), (Rasmussen et al., 2012), (Roudaut et al., 2013) regroupe les préconisations pour l'utilisation de la dynamicité du changement et des effets générés sur les modalités de perception et d'action.

Homogénéité / hétérogénéité (s2s 1)

Une surface peut être lisse, homogène et continue comme le verre (cas limite d'une surface selon (Gibson, 1979)) de l'écran tactile d'un smartphone, d'une tablette ou des dispositifs utilisés dans les nouveaux systèmes avioniques. Elle peut-être fragmentée, morcelée, discontinue comme dans les projets *Transform* de (Ishii et al., 2015) ou *Lumen* de (Poupyrev et al., 2004) autour du concept de pixels physiques. Une surface va exprimer sa capacité à supporter la consultation d'information et l'interaction tactile en fonction de son niveau d'homogénéité ; nous avons précisé ces niveaux attendus pour pouvoir répondre aux exigences de notre domaine d'études :

- *Surface d'affichage étendue*. Les surfaces tactiles doivent être suffisamment grandes pour supporter la collaboration, le partage d'information, la modularité et la reconfigurabilité des interfaces. Ces principes permettent de répondre aux exigences de « *Collaborative Awareness – RU3, Availability – RS3 et Configurability – RI3* » de l'espace de conception initial (Vinot et al.,

2016) et reprennent les avantages soulignés par (Garcia-Ruiz, 2013) et (Hourlier, 2015) des surfaces d’affichage de grande taille.

- *Surface d’interaction tactile continue.* La surface doit permettre les gestes tactiles amples, continus et articulés (successions de différents gestes). La réalisation de gestes impliquant le corps par l’utilisation du canal proprioceptif favorise la précision et la conscience de la situation (Brave et al., 1998), (Cohen and McGee, 2004). D’autre part, les gestes de configuration doivent être visibles et partagés entre les membres de l’équipage pour favoriser la conscience de la situation et la reprise de commande en cas de désengagement des systèmes automatiques (Casner et al., 2014). Enfin, la continuité de la surface a été jugée comme « engageante » et « accueillante » pour le prototype *Multi-plié* P2, alors que pour le prototype *GazeFrom* les persistances de discontinuités résiduelles sur la surface lorsque les boutons rotatifs étaient rétractés ont gêné la complétion d’un geste tactile continu. C’est donc, comme nous l’avons déjà souligné pour la propriété *Porosity*, la transformation continue de fond en figure qui permet de préserver la fonction c’est à dire l’essence de fond comme support d’affichage et d’interaction. La modularité, la porosité et la fragmentation sont des propriétés physiques qui s’opposent structurellement à la continuité de la surface d’interaction. D’autre part, la caractéristique de continuité de la surface d’interaction peut favoriser le thème « *Spatial Interaction (SI)* » du cadre conceptuel de (Hornecker and Buur, 2006) en supportant les mouvements corporels larges, expressifs et observables.

Rigidité/souplesse (s2s 2)

Cette propriété exprime les capacités de la surface à supporter l’action tactile, guider le geste, résister aux forces d’appui et changer de forme ou de taille. Une surface rigide est un bon support à l’action mais ne peut pas être physiquement reconfigurée comme les plaques de plexiglas utilisées comme des guides pour faciliter l’interaction tactile dans les études de (Colley et al., 2016) et (Tory and Kincaid, 2013). Alors qu’une surface souple favorise les reconfigurations de forme comme dans le projet Paperform de (Lahey et al., 2011) ou les écrans flexibles de (Nagaraju, 2013), elle ne permet pas de guider le geste car trop souple pour résister au glissement du doigt, comme avec les écrans élastiques de (Dand and Hemsley, 2013). Afin de répondre aux exigences de l’activité les degrés de rigidité ou souplesse doivent permettre de favoriser les usages suivants :

- *Favoriser la confrontation.* Certains mouvements picturaux questionnent le support, le cadre le lieu de monstration pour favoriser une confrontation physique aux œuvres et inscrire le spectateur dans une action globale de perception qui ne s’arrête pas aux limites de l’image (voir section 3.1.2.3). Ce même questionnement peut être réalisé avec la surface tactile reconfigurable, elle doit offrir de la rigidité pour guider le déplacement du doigt et aussi de la souplesse pour capter des gestes de transformation (pincement ou pliage de la surface). Elle doit proposer un cadre avec une rigidité variable pour

contenir et structurer, comme souligné par les pilotes au sujet de *Multi-plié* P2 : « *Je pose mes mains [sur la surface], si vraiment ça [l'avion] remue, je garde la précision* » (P5). Souple pour développer « *un jeu infini entre le monde, l'image et les limites de l'écran* » (Chatonsky, 2008), confirmé par le pilote P1 : « *puisque là tu as la forme et l'image. Rien que ça tu as les deux* ». Souple aussi pour obtenir un couplage profond, véhiculant l'illusion d'un même objet numérique et physique (Koleva et al., 2003). Enfin, cette variabilité de la rigidité offre un espace, une épaisseur d'interaction qui permet de penser la surface non plus comme une limite mais comme un espace charnière entre le corps le système et l'environnement, à l'image du traitement de la surface façade des architectes modernes, point central de la relation entre le bâtiment, l'utilisateur et l'environnement (voir section 3.1.2.2). Ainsi la surface n'est pas une simple limite physique mais comme le propose (Gibson, 1966) elle doit se penser dans l'épaisseur et la distance entre le corps et son environnement.

- *Permettre la transformation.* L'écran est générique dans sa capacité à afficher des données 2D par le changement d'état de la trame répétitive de pixels. Il doit aussi l'être par sa souplesse pour proposer une génération de formes diversifiée. L'intérêt de la généricité d'affichage de l'écran tactile souligné par les industriels pour développer ces nouveaux dispositifs ne doit pas être anéantie par une reconfiguration limitée répondant à un usage exclusif. Nous retrouvons cette limite dans le prototype *GazeForm* avec l'émergence d'un bouton rotatif non flexible (forme, position), et utilisé pour la réalisation d'une tâche spécifique.
- *Résister au contexte d'usage.* Dans le contexte aéronautique et plus généralement dans les environnements d'utilisation de surfaces tactiles où le corps est engagé dans un rapport physique d'action et de surveillance (conduite automobile, tactile en mobilité, etc.), la résistance de la surface tactile reconfigurable doit permettre de se tenir (comme l'a explicité un pilote « *c'est le bouton qui tient la main* » (section 2.3.2)), de reposer ou stabiliser sa main lors de l'interaction, de limiter les impacts des vibrations et turbulences sur les postures physiques et les processus cognitifs des opérateurs (voir section 2.2.4).

Accessibilité (s2s 3)

La position et l'orientation de la surface par rapport à l'utilisateur déterminent les possibilités d'action et de perception. Trop loin ou inclinée elles ne favorisent pas l'action tactile ; trop petite et excentrée dans l'espace du cockpit elles n'offrent pas de support au partage et à la collaboration.

- *Visible dans l'espace physique.* Pour offrir un support à la collaboration la surface tactile reconfigurable doit être visuellement partageable dans l'espace d'interaction en respectant les matrices des transitions oculaires existantes (Kasarskis et al., 2001). En plus de favoriser l'accès à la consultation, la disposition et la taille de la surface doit faciliter le partage des actions

tactiles des opérateurs sur les systèmes et ainsi améliorer la conscience de la situation (Speelpenning et al., 2011).

- *Favoriser la perception écologique des affordances.* La transformation de la surface pour inciter à l'action (un bouton à tourner dans le cas de *GazeForm* ou un pli à pincer pour *Multi-plié*) doit être visible et appréhendable par l'utilisateur. La surface qui s'incline pour « offrir » (Gibson, 1979) un reposoir de stabilisation pour l'action tactile doit être positionnée de façon ergonomiquement cohérente par rapport au corps du pilote, ce corps mesurant de « *par lequel nous pouvons fréquenter ce monde, le comprendre et lui trouver une signification* » (Merleau-Ponty, 1945). Il en est de même pour les possibilités d'agir tactilement sur une surface : l'inclinaison et la disposition ainsi que la transformation doivent renseigner sur la modalité d'action attendue. Cette propriété supporte les thèmes NP (*Naïve Physics*) et BAS (*Body Awareness and Skills*) du modèle Reality-Based Interaction (RBI) (Jacob et al., 2008) (voir section 3.2.2) en exploitant la connaissance du monde des utilisateurs et la conscience de leur propre corps pour inciter, favoriser l'action.
- *Réduire les efforts musculo-squelettiques.* Comme précisé dans la section 2.5.4, le positionnement des écrans tactiles dans les cockpits ainsi que la durée de la tâche de réglage peuvent être à l'origine de fatigue musculaire ou de troubles musculo-squelettiques (Barbé et al., 2012). Afin de réduire cet impact, la surface reconfigurable doit offrir des inclinaisons et des distances d'action permettant de réduire les efforts musculo-squelettiques.

Couplage (s2s 4)

Des surfaces peuvent être couplées entre elles pour permettre une reconfiguration par articulation (section 3.3.2.1) comme la tablette double écrans de (Hinckley et al., 2009), ou les prototypes *Multi-plié*. La propriété de couplage peut aussi exprimer le lien entre la forme de la surface et les données numériques, entre l'affichage 2D et la forme de l'afficheur, entre le contexte et les affordances offertes par la forme de la surface, entre les gestes réalisés et les déformations produites ou encore, entre la structure visible et le résultat de la déformation.

Couplage des surfaces entre elles. Les rapports topologiques entre les surfaces vont permettre de modifier la géométrie des plans d'action et mettre en évidence des invariants dans la structure du champ optique pour favoriser la perception des affordances (Gibson, 1979). Dans le cas de *GazeForm*, la modification de niveau de la surface du sommet du bouton par rapport à la surface du fond, invite à l'action de saisir et manipuler. Les bords du bouton sont perçus comme des invariants du champ optique et leurs déplacements induits une affordance. En plus du canal visuel la modification des rapports topologiques de surfaces permet par le sens tactilo-kinesthésique de percevoir l'état de surface et les invitations à l'action. C'est le cas aussi pour les prototypes *Multi-plié*. Par exemple dans la version P1 l'inclinaison des écrans invite à la consultation de l'information visuelle, au repos de la main ou à l'interaction tactile. Avec la version P2, comme nous l'avons vu dans la section précédente (7.2), la production d'une

ondulation par plissage (utilisation de la propriété *Zero-Crossing*) génère de nombreux invariants (bords occluants, surfaces révélées et masquées de façon temporaire) et facilite ainsi la perception écologique des invitations à l'action (Figure 100). Par ailleurs, le couplage des surfaces entre elles peut être déterminé par le caractère modulaire du dispositif. La possibilité de re-disposer des modules de surfaces entre eux permet d'enrichir les modalités d'action/perception tout en conservant une bonne intelligibilité du comportement du système. Enfin, la structure répétitive et rythmique produite par l'articulation des surfaces entre elles offre un support à la réalisation de séquences d'actions (validation en écrasant les plis pour le prototype P2) permettant de produire des combinaisons d'expériences sensorimotrice temporalisées. Combinaisons qui apparaissent comme des signatures rythmiques permettant à l'utilisateur de « maintenir un engagement sensorimoteur continu et coordonné avec son environnement » (Clark, 2011).

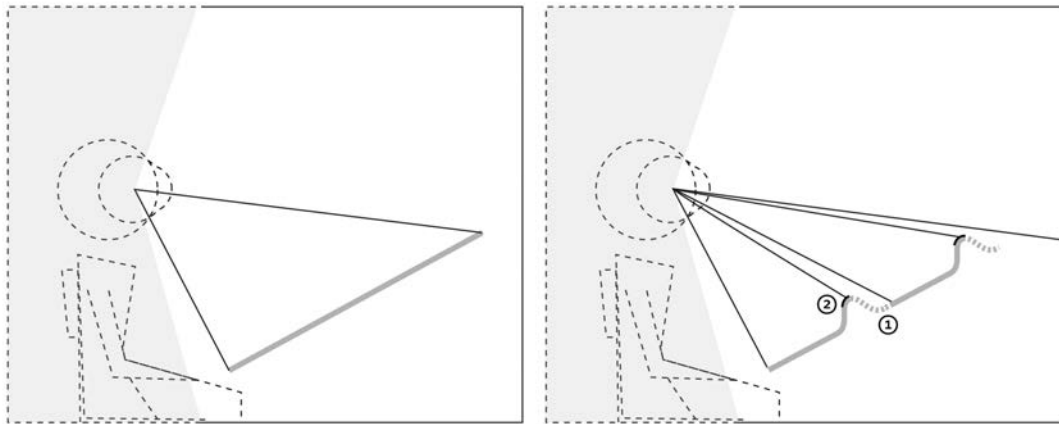


Figure 100. Schéma de la modification du flux optique par le plissage de la surface *Multi-plié* ; les surfaces pointillées (2) se dévoilent au regard masqué par les bords occluants qui apparaissent comme des invariants du flux et renseignent des actions possibles (affordances)

- *Couplage de la forme physique et des données numériques.* La modification de la forme de l'interface comme incarnation physique des données fait partie des propriétés des TUI (*Tangible User Interface*). Définies dans un premier temps par (Ishii and Ullmer, 1997) puis élargies au concept d'interactions incarnées par (Hornecker and Buur, 2006). Cet élargissement permet de définir l'acceptation plus générale d'Interaction Incarnée en déplaçant le centre de gravité des préoccupations de la conception, de l'interface à l'interaction (voir section 3.1.3.2). Nous retrouvons ce principe d'incarnation physique des données dans les prototypes *Muti-plié* et plus précisément dans la version P2. L'effet visuel d'un pli relevé pour attirer l'attention des pilotes sur une action à réaliser a été explicité comme : « *de la vraie 3D ... on est vraiment interpellé en trois dimensions* » (P4). Ce codage de l'information par la saillance d'un item dans une série a été unanimement perçu comme un dysfonctionnement d'un système ou l'absence de réalisation d'une action dans un ensemble : « *par exemple tu commences ta descente, tu es en mode "descent", et tu n'as pas rempli les performances atterrissage : il y a un pli qui sort* » (P4). En utilisant des

règles écologiques de perception pour profiter des habiletés des utilisateurs à percevoir dans un environnement physique, le couplage entre la forme physique et les données numériques favorise l'extraction rapide d'informations du champ visuel sans passer par des processus d'interprétation de représentations symboliques (Gibson, 1979). Cette propriété supporte le thème *Expressive Representation* (ER) du cadre conceptuel de (Hornecker and Buur, 2006).

La richesse de ce couplage est déterminée par les caractéristiques de déformation du dispositif. Comme explicité dans la section précédente, les transformations topologiques des dispositifs sont rendues possibles par la modification conjointe des propriétés de *Size* (longueur, volume, surface), *Amplitude*, *Zero-Crossing*, *Speed* et *Granularity* (densité de point d'actuation). Cependant, pour produire des transformations facilement appréhendables par l'utilisateur, il peut être nécessaire de limiter certaines propriétés comme par exemple l'utilisation d'une faible densité de points (*Granularity*) dans le prototype *Multi-plié* P2.

- *Couplage de la surface et de la structure.*
La surface peut soit être un habillage du dispositif qui masque les fonctionnements internes (comme dans *GazeForm*), soit révéler par la visibilité de son arrangement structurel ses comportements de transformation (comme dans *Multi-plié*). Comme nous l'avons précisé dans la section 6.6, la perception de l'arrangement structurel et articulatoire de la surface favorise la compréhension des transformations possibles. Cette propriété reprend le thème *Naïve Physics* (NP) du modèle Reality-Based Interaction (RBI) (voir section 3.2.2) ; l'utilisateur connaît le fonctionnement du monde physique en percevant un arrangement structurel, et peut donc en déduire un comportement. Même si la surface-enveloppe peut favoriser les propriétés d'homogénéité et de continuité elle présente le risque de maintenir l'utilisateur à distance du fonctionnement de la machine (Crawford, 2016).
- *Couplage entre la forme de la surface écran et les informations affichées.* C'est une propriété que nous n'avons pas imaginé lors de la phase de conception mais qui s'est avérée essentielle au regard des évaluations. Les pilotes ont souligné, par exemple, les effets bénéfiques de la segmentation, de la saillance et des transformations sur la perception visuelle (section 6.6). Le cumul, le lien, voire la congruence de la représentation 2D avec la forme du dispositif ont été appréciées et considérées comme très efficaces pour la perception visuelle. Cette propriété de couplage qui renvoie au thème *Expressive Representation* (ER) de (Hornecker and Buur, 2006) (voir section 3.2.2). Ce couplage est favorisé par l'utilisation d'une surface transformable conservant ses propriétés de surface écran dans tous les états de déformation, ce qui est le cas de la version P2 de *Multi-plié* par la création d'ondulation de la surface continue (utilisation de la propriété *Zero-Crossing*).
- *Couplage de la forme de la surface et du contexte d'usage.* Comme nous l'avons démontré dans l'évaluation *GazeForm*, le couplage de la forme de l'interface au contexte d'usage (modification de la position du regard) permet d'améliorer la distribution de l'attention visuelle, la performance et la sensation de

contrôle (section 5.7). Le déclenchement de la transformation de l'interface en fonction de l'évolution du contexte ne nuit pas à la continuité de la manipulation. Les délais de latence de la transformation par rapport à l'événement déclencheur (propriété Speed) sont à optimiser pour produire un système réactif et favoriser son acceptabilité.

- *Couplage du geste de manipulation et de la forme de la surface.* Même si le fait de proposer une entrée dans le système par la manipulation physique de l'interface est un comportement classique des interactions tangibles, nous voulons par cette propriété spécifier les effets de ce comportement sur les modalités de perception et d'action. Que ce soit pour enfoncer le bouton du prototype *GazeForm* ou aplatir les plis du prototype *Multi-plié* P2, les pilotes ont exprimé le désir d'agir physiquement sur l'interface pour la transformer (section 6.6.2). Ils ne souhaitent pas simplement agir pour déclencher un processus de transformation motorisé, comme ce que nous avons proposé par l'enfoncement d'un pli par un tap sur le sommet, mais réellement transmettre une force qui sculpte le matériau de manière progressive, à la manière d'un sculpteur qui forme un pain d'argile par des mouvements successifs.

Pour conclure ce chapitre, nous proposons de comparer les trois prototypes *GazeForm* et *Multi-plié* en utilisant l'espace de conception *s2s*. Nous avons représenté graphiquement la capacité des prototypes à supporter une propriété, à l'instar de la caractérisation des prototypes avec la taxonomie de (Kim et al., 2018) (Figure 97). En disposant des carrés de couleurs, pour chaque prototype, sur un axe horizontal séparé en 4 colonnes nous exprimons une échelle qui va de ce comportement est : *impossible* – *en partie possible* – *possible* – *complètement possible* ou de *inexistant* à *très fort* pour la propriété de couplage (*s2s_4*).

Pour la propriété d'homogénéité, nous constatons que *GazeForm* avec sa surface perforée pour faire émerger un bouton est sans surprise le moins à même d'offrir un support pour des gestes continus et afficher des informations riches. Alors que *Multi-plié* P2 surface « plissable » offre, pas sa surface continue, un espace d'affichage et d'interaction homogène. Même si pour la propriété de *Rigidité/souplesse* nous n'avons pas exploré l'utilisation d'un matériau à rigidité programmable, nous constatons que la mise en œuvre, dans le prototype Multiplié surface « plissable », d'une structure composite souple (intégration de la couche de structure, du motif de déformation et des capteurs tactiles dans une seule épaisseur) offre par son degré de flexibilité un support à l'action tactile ainsi qu'une richesse de possibilités de déformations. Ce n'est pas le cas des deux autres prototypes qui sont limités par l'utilisation d'un matériaux rigide et non déformable. Une fois de plus, c'est le prototype *Multi-plié* P2 qui supporte le mieux la propriété d'*Accessibilité* : le nombre de plis ainsi que l'amplitude offerte entre le pli en sailli et le pli en creux favorisent la perception écologique des affordances et réduisent les efforts musculo-squelettiques. Enfin pour la propriété de *Couplage*, le prototype *GazeForm* n'offre que très peu de possibilités de couplage ; sa structure rigide, spécifique à une tâche et dédiée à la manipulation sans les yeux (pas d'adaptation de l'image à la forme de l'interface) limite

grandement les possibilités. Alors que le prototype *Multi-plié* P2, par le concept même de surface souple « plissable » offre un bon support des différentes propriétés de couplage.

Espace de conception s2s

Homogénéité / hétérogénéité (s2s_1)

capacité de la surface à afficher des informations riches et à supporter des gestes tactiles amples, paratgeables, continus et articulés

Rigidité / souplesse (s2s_2)

capacité de la surface à proposer une rigidité pour supporter l'action tactile, guider le geste, résister aux forces d'appuis et une souplesse pour capter des gestes de transformation (pincement ou pliage de la surface), permettre une richesse de la transformation.

Accessibilité (s2s_3)

Capacité de la surface à favoriser la visibilité dans l'espace physique, favoriser la perception écologique des affordances et réduire les efforts musculo-squelettiques.

Couplage (s2s_4)

- Couplage des surfaces entre elles
- Couplage de la forme physique et des données numérique
- Couplage de la surface et de la structure
- Couplage entre la forme et les informations affichées
- Couplage de la forme de la surface et du contexte d'usage
- Couplage du geste et de la forme de la surface

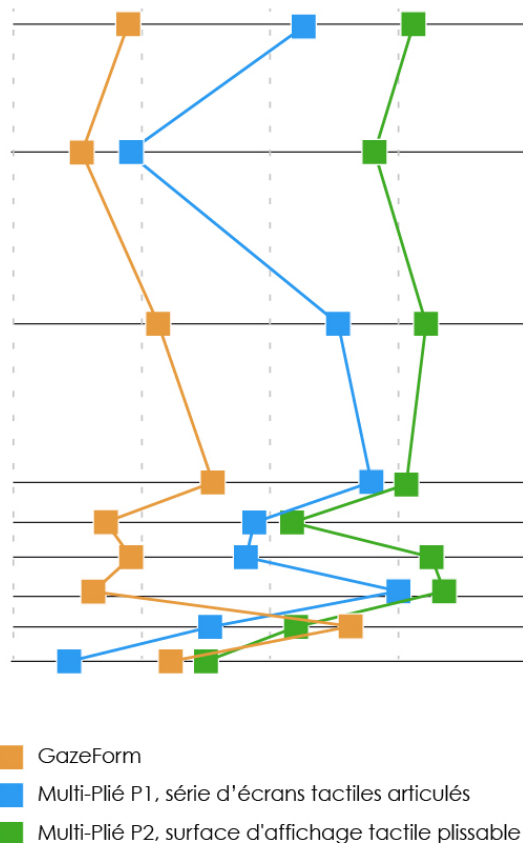


Figure 101. Caractérisation des prototypes *GazeForm*, *Multi-plié* P1 et P2 dans l'espace de conception s2s

7.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, pour s'extraire du contexte d'étude et pouvoir généraliser la connaissance produite à d'autres environnements nous avons analysé les transformations topologiques des trois interfaces tactiles reconfigurables des études *GazeForm* et *Multi-plié*. Une analyse qui nous a permis de spécifier des propriétés et constituer un espace de design utilisable pour la conception et l'évaluation de surfaces tactiles reconfigurables.

En utilisant la taxonomie de (Kim et al., 2018) basée sur le travail de (Roudaut et al., 2013) qui propose l'utilisation d'un modèle géométrique NURBS (Non-Uniform Rational Basis Splines) nous avons analysé les prototypes avec les propriétés *Size*, *Modularity*, *Granularity*, *Porosity*, *Curvature*, *Amplitude*, *Zero-Crossing*, *Closure*, *Stretchability*, *Strength*, *Speed*. Par exemple pour la propriété *Granularity* (densité de point d'actuation) nous avons conclu qu'une *Granularity* importante peut nuire à l'intelligibilité du fonctionnement du dispositif et que l'utilisation d'une *Granularity* dynamique (activation/désactivation d'un point d'actuation) peut permettre de réaliser des transformations d'une même

structure suivant différents niveaux d'échelle. Autre exemple, pour la propriété *Zero-Crossing* nous avons vu que la transformation d'une forme ondulée permet de favoriser la perception des affordances tout en offrant une continuité de la surface d'interaction.

A partir des données issues de l'analyse de l'activité (chapitre 2), du cadre théorique (chapitre 3), des résultats des évaluations des prototypes *GazeForm* (chapitre 5) et *Multi-plié* (chapitre 6) et de la caractérisation des déformations topologiques (présentée précédemment), nous avons spécifié les principes de design de l'espace de conception *s2s* pour les interfaces tactiles reconfigurables. Nous avons défini les principes d'Homogénéité/hétérogénéité, Rigidité/souplesse, Accessibilité et Couplage en nous intéressant aux effets de la forme et des transformations de l'interface tactile sur les modalités d'action/perception dans un contexte d'activité avec une forte division de l'attention visuelle. Pour chaque principe nous avons détaillé les modalités offertes en fonction des caractéristiques physiques de l'interface. Par exemple pour le principe « Favoriser la confrontation » nous avons précisé que la surface tactile reconfigurable doit offrir de la rigidité pour guider le déplacement du doigt et aussi de la souplesse pour capter des gestes de transformation. L'utilisation d'un matériau avec une rigidité programmable permettrait d'offrir cette variabilité la résistance mécanique.

Nous avons terminé ce chapitre en présentant une analyse comparative, succincte, des 3 prototypes en utilisant l'espace de conception *s2s*. Nous constatons que le prototype *Multi-plié* P2 est celui qui supporte le mieux les propriétés de transformation de l'espace de conception et offre ainsi le plus de richesse dans les modalités de perception et d'action.

7.5 CONTRIBUTIONS

– *Un espace de conception pour les surfaces tactiles reconfigurables utilisables dans un contexte de forte division de l'attention visuelle.*

8 CONCLUSION

*Le cadre disparaît, c'est une surface sans bords, le corps devient le bord de l'image.
(Dalmasso, 2018)*

8.1 LES OBJECTIFS DE LA THESE

Ce travail de thèse avait pour but d'explorer la « ré-incarnation » des interactions tactiles par la transformation physique de la surface d'interaction. Nous avons, par la modification de la forme de la surface tactile, cherché à impliquer les compétences motrices des utilisateurs ainsi que leurs habiletés à négocier, manipuler et s'orienter dans leur environnement. Au travers d'une étude du statut du corps dans l'activité de pilotage et d'un état de l'art sur les limites des interactions tactiles, nous avons mis en lumière que contrairement aux commandes physiques les écrans tactiles sollicitent fortement le canal visuel, ne favorisent pas la conscience mutuelle et la collaboration de l'équipage, et ne sont pas sûrs et performants dans des environnements dynamiques soumis aux vibrations et aux accélérations. Pour répondre à ce problème d'utilisabilité nous avons cherché à démontrer que, comparativement à un écran tactile présentant une surface plate et rigide, la transformation d'une surface tactile permet :

- *de réduire la charge de travail, d'améliorer la distribution de l'attention visuelle, de favoriser la collaboration et d'améliorer la performance,*
- *de répondre aux exigences de performance et de sécurité pour des contextes dégradés (ex. turbulences, vibrations, fumée dans le cockpit, stress et charge cognitive élevée) ainsi que des contextes d'interaction présentant une forte contrainte de division de l'attention visuelle.*

Pour répondre à ces objectifs, spécifiques à notre domaine d'étude, nous avons rempli des objectifs théoriques :

- *caractériser les limites des interactions sur surfaces tactiles,*
- *analyser le statut du corps dans l'activité de pilotage,*

–enrichir l'espace de conception des interactions tactiles avec les théories de la perception écologique, de l'interaction tangible et de l'interaction incarnée.

8.2 SYNTHÈSE DES RESULTATS

Pour répondre aux objectifs spécifiques au domaine d'étude, nous avons défini trois axes principaux de recherche (activité oculaire, sensation et niveaux de contrôle, continuité) pour lesquels nous avons spécifié des questions de recherche particulières. Pour explorer ces questions de recherche nous avons conçu, fabriqué et évalué trois prototypes fonctionnels. Nous allons, dans un premier temps, revenir sur chaque question en rappelant les réponses apportées par notre travail. Puis nous rappellerons les résultats des objectifs théoriques.

8.2.1 Activité oculaire

Pour cet axe de recherche nous avons spécifié la question suivante :

L'interface tactile reconfigurable permet-elle de réduire la demande d'attention visuelle, améliorer la distribution de l'attention, libérer l'attention visuelle de manière flexible en cas de besoin, réduire les interruptions dans les circuits visuels de surveillance et favoriser la continuité de la surveillance suivant un rythme régulier, homogène et contrôlé ?

Grace à l'étude *GazeForm* (chapitre 5), nous démontrons que le changement de forme d'une surface tactile en fonction de la direction du regard permet de **réduire la demande visuelle** et d'**améliorer la répartition de l'attention** entre les différents écrans. Le regard se retrouve ainsi « libéré » et peut être sollicité de manière flexible pour mener à bien la tâche réglementaire de surveillance des systèmes. Cette optimisation de l'utilisation des ressources visuelles permet de **diminuer la charge de travail** et d'**améliorer la performance**

Les résultats de l'étude *Multi-plié* (chapitre 6) montrent les **effets bénéfiques** de la forme du support d'affichage et de ses déformations sur la **perception visuelle**. Le lien entre la forme du support (segmentation des écrans, épaisseur des bords, agencement des écrans) et le contenu affiché favorise la ségrégation, la structuration de l'information et la création de liens de dépendance entre les contenus, autant de qualités qui **réduisent le besoin d'attention visuelle** pour accéder à l'information. Par ailleurs, les mouvements de transformation de la surface s'avèrent **plus efficaces visuellement** pour percevoir les notifications. Enfin la création de forme pour stabiliser la main ou pour guider l'action tactile permet de fournir une référence spatiale facilitant **l'interaction sans l'utilisation du canal visuel**.

8.2.2 Sensation et niveaux de contrôle

La surface tactile reconfigurable permet-elle d'améliorer la performance (taux d'erreur faible, robustesse à l'interruption, temps d'exécution plus rapide). La structure de la déformation et les propriétés des transformations (vitesse,

amplitude, etc.) permettent-elles de favoriser la perception des notifications et alarmes, de supporter la programmation et le déroulement de séquences d'actions, et d'améliorer la hiérarchisation des priorités ?

L'étude *GazeForm* nous permet de conclure que la transformation d'une surface tactile ainsi que l'ajout du contrôle de la forme de la surface tactile par le regard **ne pénalisent pas les activités réglementaires de surveillance visuelle** des systèmes. Par ailleurs la surface tactile transformable permet de faire **moins d'erreurs** de réglages et **améliore l'efficacité**. Concernant le niveau de contrôle une modélisation plus fine de l'activité et des schémas cognitifs et sensori-moteurs impliqués dans la coordination geste-regard est nécessaire pour concevoir un système adaptatif efficace.

Avec l'étude qualitative des deux prototypes *Multi-plié* nous confirmons la pertinence de la saillance par la forme pour les **notifications**. Cette propriété est renforcée par la congruence possible de la représentation 2D avec la forme du dispositif. La structure répétitive des plis du prototype P2 s'est avérée très efficace pour supporter le **séquençage d'actions** ainsi que les **gestes de validation**. La **programmation d'actions** à réaliser, le **rappel de l'action** en cours pour reprendre une procédure après une interruption ou encore la **hiérarchisation des actions** sont autant de fonctionnalités supportées par la structure simple et répétitive de la surface continue « plissée ». Enfin, nous démontrons qu'une interface tactile transformable, par la création de supports physiques pour stabiliser ou guider le geste tactile, permet de **répondre aux exigences** de performance et de sécurité pour des **contextes dégradés** (ex. turbulences, vibrations, fumée dans le cockpit, stress et charge cognitive élevée).

8.2.3 Continuité

La transition d'un état de forme à l'autre, de la surface globale à la surface locale, permet-elle une interaction suffisamment fluide et continue ? Comment concevoir la continuité de la surface et des transformations pour supporter les interruptions et favoriser la reprise de tâche ? Comment concevoir les transformations pour assurer la continuité entre les tâches à réaliser (ex. réglage, surveillance, collaboration) et entre les modalités d'interaction offertes (ex. tactile, tangible) ?

Nous concluons, avec l'étude *GazeForm*, que le changement de modalité (tactile, rotateur physique) **n'altère pas les performances** de réalisation d'une tâche de réglage. Concernant la continuité au sein d'une modalité nous montrons que la manipulation d'un interacteur physique, à la différence de l'interaction tactile, permet d'effectuer des réglages en plusieurs étapes avec de **micro-interruptions dans le geste**. Enfin nous concluons que la personnalisation des paramètres de transformation (ex. latence et vitesse de changement) peut altérer la confiance dans le fonctionnement du dispositif et nuire à la continuité de l'interaction.

Avec l'étude *Multi-plié* nous démontrons que la **continuité de la surface**, utilisée dans le prototype P2, favorise le support de **gestes tactiles amples et**

continus. Concernant les gestes de transformation nous montrons que le couplage entre le geste effectué et son effet sur la surface doit être fin et progressif pour favoriser le support d'une interaction continue.

8.2.4 Objectifs théoriques

Nous avons caractérisé les risques potentiels de la « tactilisation » des systèmes avioniques sur l'activité de pilotage. Une contribution qui par exemple nous a permis de confirmer les effets importants de l'interaction tactile sur l'attention visuelle, ce qui a été à l'origine de notre travail de conception du prototype *Gaze-Form* et de l'étude sur l'émergence de formes saisissables de la surface tactile pour soulager l'utilisation du canal visuel. En produisant des solutions pour « libérer le regard » nous avons constaté des effets induits positifs sur la performance, la charge de travail, la sensation de contrôle et la satisfaction. Même si dans *Multi-plié* la question de l'attention visuelle était moins centrale dans les préoccupations de conception, nous avons constaté que la forme du dispositif d'affichage a un effet déterminant sur la perception visuelle. Cette propriété observée confirme que « toute expérience du visible [est] toujours donnée dans le contexte des mouvements du regard, le spectacle visible appartient au toucher ni plus ni moins que les "qualités tactiles" » (Merleau-Ponty and Lefort, 1979).

Par l'étude du statut du corps et de l'espace du cockpit dans l'activité de pilotage nous avons contribué à enrichir les connaissances des phénomènes de perception et d'action des pilotes dans leur environnement. Les capacités sensorimotrices des pilotes, leur sens tactilo-proprio-kinesthésique, leur habileté à manipuler et percevoir l'environnement physique sont apparues comme autant de mécanismes mis en œuvre pour « faire corps avec l'avion ». Ces sensations explicitées par les utilisateurs ainsi que les phénomènes observés ont fondé notre travail de conception des trois prototypes et notre approche théorique de la « ré-incarnation » de l'interaction tactile en nous incitant à repenser la place du corps dans l'espace d'interaction par l'utilisation des théories de la perception incarnée et de l'interaction tangible. Par cette étude, nous avons souligné, entre autres, que les pilotes utilisent la perception tactilo-proprio-kinesthésique pour confirmer la perception visuelle globale d'une scène, propriété que nous avons implémenté dans le prototype Multi-Plié P2 et qui a été reprise pour enrichir le principe « *Couplage de la forme physique et des données numériques* » de l'espace de conception s2s. Nous avons aussi relevé l'importance du rythme dans le séquençement des gestes, des balayages visuels et de la prise de parole des pilotes dans l'environnement du cockpit. Même si nous avons traité cette caractéristique de l'activité dans le prototype *GazeForm* (combinaisons geste-regard temporalisé) ou par le prototype *Multi-Plié* P2 en offrant un support à la réalisation de séquences d'actions permettant de produire des combinaisons d'expériences sensorimotrice temporalisées, il nous semble intéressant d'affiner la compréhension de ce phénomène. En effet, le flux d'information temporalisé avec ses multiples signatures rythmiques perçu par les différents sens permet à notre cerveau de détecter les configurations sensorielles anormales. C'est un processus qui joue un rôle dans l'apprentissage précoce du raisonnement catégoriel et conceptuel (Crawford,

2016) et qui permet de « maintenir un engagement sensorimoteur continu et coordonné avec son environnement » (Clark, 2011).

Enfin l'enrichissement de l'espace de conception des interactions tactiles avec les théories de la perception écologique, de l'interaction tangible et de l'interaction incarnée ainsi que l'étude de concept de surface nous ont permis de fonder l'espace de conception s2s. Cet espace, à la fois outil de conception et d'évaluation, est une contribution dans le champ des interfaces reconfigurables et plus largement dans celui de l'Interaction Tangible. Dans le cadre de cette conclusion, il nous paraît important de souligner le concept de surface comme **espace charnière** et de surface comme lieu d'articulation de **la figure et du fond**, du **visible et de l'invisible**. Ces concepts sont fondamentaux pour notre espace de conception s2s et potentiellement riches pour des recherches futures. Comme nous l'avons vu dans notre étude sur le concept de surface en peinture et cinéma, le cadre¹¹, de la surface picturale à l'écran interactif, est progressivement débordé par des flux d'informations venant se superposer et se télescoper. Il n'est plus simplement une limite entre le visible et l'invisible mais devient une liaison dynamique entre les informations représentées. Par la transformation de la forme de la surface nous avons cherché à amplifier ce débordement pour qu'il se produise au-delà des données numériques représentées entre l'objet physique support de l'image, l'environnement et le corps de l'utilisateur. Ainsi l'image ne se donne pas uniquement à voir par la vision mais peut être perçue dans l'espace physique par les capacités sensorimotrice de l'utilisateurs. L'écran ne sert plus uniquement à isoler une portion d'espace pour en faire l'objet d'attention ou à cadrer de la figure sur un fond mais en se pliant et dépliant elle offre une transformation de son statut même de fond ou de figure. Ainsi le cadre disparaît, la surface tactile transformable devient une surface sans bord, le « corps devient le bord de l'image » (Dalmaso, 2018).

8.3 PERSPECTIVES

Ce premier travail de recherche sur la « ré-incarnation » des interactions tactiles par la transformation de la surface nous a permis d'identifier des opportunités de recherche pour des travaux futurs. Nous faisons état de ces opportunités en les regroupant suivant trois catégories (contextes dégradés, rétroactions haptiques vibratoires, matériaux programmables).

Contextes dégradés

Nous avons, au travers de la littérature scientifique, des entretiens avec des pilotes, des observations in situ dans des cockpits d'avion de ligne, pu étudier les impacts des contextes dégradés de vol sur l'activité de pilotage. Cependant nous n'avons pas eu le temps dans le cadre de ce travail de recherche d'évaluer les prototypes produits dans des environnements simulant ce type de contexte. A moyen terme, une expérimentation contrôlée va être réalisée par une

¹¹ Le mot cadre désigne les bords ainsi que le fond de la surface

chercheuse en IHM de l'ISAE. Pour reproduire un contexte de turbulence. L'étude se déroulera sur le simulateur dynamique 6 degrés de liberté conçu et fabriqué dans le cadre du projet Airtius (Figure 102). Les enregistrements de turbulences en vols réels sur un A320 seront utilisés pour simuler des mouvements de la plateforme. Des mesures de temps de perception, de temps de réaction, de nombre d'erreurs et de satisfaction seront réalisées pour évaluer les apports de la transformation d'une surface tactile, comparativement à un écran tactile classique, en contexte de turbulences (faibles à très fortes).



Figure 102. Simulateur cockpit dynamique, 6 degrés de liberté, pour le test des dispositifs en contextes dégradés (ex. turbulences, vibrations, accélérations)

Par ailleurs, il serait intéressant d'utiliser la plateforme de simulation (Figure 102) pour réaliser des observations permettant de mieux comprendre les effets d'un contexte dynamique (ex. vibrations, accélérations, turbulences) sur les interactions tactiles. Même si ce type d'outil ne permet de simuler que de façon parcellaire les mouvements d'un vol réel (les débattements sur chaque axe étant limités à 22cm), elle permet d'équiper le pilote de nombreux capteurs (ex. oculomètre, casque à électrodes pour électroencéphalogramme (EEG), électromyogramme (EMG)) sans devoir se préoccuper des autorisations et des risques d'une mission en condition réelle. Ces mesures, en plus des entretiens, pourraient permettre une compréhension plus fine des mécanismes physiologiques en jeu. L'objectif serait de faire cohabiter une méthode holistique (par l'étude ethnographique) avec une approche atomistique de la compréhension des circuits de perception-action des fonctions sensorimotrices. Cette démarche permettrait d'appréhender plus finement les intégrations fonctionnelles révélant notre rapport préréflexif et sensorimoteur au réel, comme par exemple le couplage sur le plan fonctionnel de la locomotion et de la vision qui permet d'orienter notre déplacement en fixant du regard une cible à atteindre (processus décrit par un pilote en parlant du minimanche de l'A320 « *cet avion, tu le mets là où tes yeux t'amènent...* »).

Rétroaction haptique vibratoire

Au cours d'un vol, le cockpit est exposé à des vibrations provenant à la fois du déplacement de l'avion dans les masses d'airs, de l'écoulement des flux sur le fuselage et du fonctionnement des moteurs. Dans ce contexte nous avons très tôt, en nous basant sur des études (Letondal et al., 2018), (Dutu, 2015) ainsi que sur des commentaires de pilotes lors des observations, choisi de ne pas explorer plus avant l'augmentation de la surface par un système haptique par vibration. Néanmoins, une piste intéressante pour les travaux futurs serait de caractériser les différentes vibrations ressentis dans un cockpit et de déterminer les conflits ou congruences possibles avec un système tactile à feedback haptique par vibrations. Par ailleurs une étude récente (Prsa et al., 2019) a souligné les interférences possibles entre la perception d'un son et d'une vibration, c'est deux stimuli seraient perçus et codés de façon similaire par le cerveau. Cette nouvelle donnée nous permet de reconsidérer la méfiance exprimée des pilotes envers le feedback vibro-tactile. Une étude sur l'impact de l'environnement sonore d'un cockpit sur la perception des feedback haptique par vibration serait intéressante.

Matériaux programmables

Initialement parmi les différentes orientations de recherche possibles nous avons envisagé une « Étude pour l'utilisation des propriétés matérielles programmables dans la conception d'interactions tangibles pour le cockpit ». Par manque de support à la fabrication à l'ENAC et de liens de partenariat avec des industriels manipulant des matériaux programmables nous avons abandonné cette orientation. Cependant au regard des résultats obtenus, il paraît intéressant d'explorer l'utilisation de matériaux programmables permettant de produire une surface avec une élasticité et une granularité configurable. En effet, la caractérisation des transformations des prototypes avec les taxonomies existantes a fait émerger la pertinence de la variabilité de la résistance mécanique de la surface en fonction des usages (ex. tactile, enfoncement, étirement) ainsi que l'augmentation dynamique de la granularité pour faire varier le rythme et la disposition des transformations. Une étude des matériaux permettant de répondre à ces besoins émergents serait une première étape pour initier un travail de recherche plus important.

9 BIBLIOGRAPHIE

Abbott, K.H., 2001. Human Factors Engineering and Flight Deck Design, in: Digital Avionics Handbook.

Ahmad, B.I., Langdon, P.M., Godsill, S.J., 2018. Stabilising Touch Interactions in Cockpits, Aerospace, and Vibrating Environments, in: Antona, M., Stephanidis, C. (Eds.), Universal Access in Human-Computer Interaction. Methods, Technologies, and Users. Springer International Publishing, Cham, pp. 133–145. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92049-8_10

Alapetite, A., Fogh, R., Zammit-Mangion, D., Zammit, C., Agius, I., Fabbri, M., Pregnolato, M., Becouarn, L., 2012. Direct tactile manipulation of the flight plan in a modern aircraft cockpit, in: Proceedings of HCI Aero.

Alberti, L.B., 1435. De pictura. Allia, Paris.

Alexander, J., Lucero, A., Subramanian, S., 2012. Tilt displays: designing display surfaces with multi-axis tilting and actuation, in: Proceedings of the 14th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services. ACM, pp. 161–170.

Amy, S., 2008. Les nouvelles façades de l'architecture. Appareil Numéro spécial. <https://doi.org/10.4000/appareil.287>

Antle, A.N., Corness, G., Droumeva, M., 2009. What the body knows: Exploring the benefits of embodied metaphors in hybrid physical digital environments. Interact. Comput. 21, 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.intcom.2008.10.005>

ARINC661: Cockpit display system interfaces to user systems, 2016. . SAE Industry Technologies Consortia.

Avsar, H., Fischer, J.E., Rodden, T., 2016a. Designing touch screen user interfaces for future flight deck operations, in: 2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Presented at the 2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC), IEEE, Sacramento, CA, USA, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1109/DASC.2016.7777976>

Avsar, H., Fischer, J.E., Rodden, T., 2016b. Mixed method approach in designing flight decks with touch screens: A framework, in: 2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Presented at the 2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC), IEEE, Sacramento, CA, USA, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1109/DASC.2016.7778066>

Avsar, H., Fischer, J.E., Rodden, T., 2016c. Future flight decks: impact of +Gz on touchscreen usability, in: Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace - HCI-Aero '16. Presented at the the International Conference, ACM Press, Paris, France, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1145/2950112.2964592>

Bachelard, G., 1938. La formation de l'esprit scientifique. Vrin, Paris.

Bachynskyi, M., Palmas, G., Oulasvirta, A., Steimle, J., Weinkauff, T., 2015. Performance and Ergonomics of Touch Surfaces: A Comparative Study using Biomechanical Simulation. ACM Press, pp. 1817–1826. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702607>

Barbé, J., Chatrenet, N., Mollard, R., Wolff, M., Bérard, P., 2012. Physical Ergonomics Approach for Touch Screen Interaction in an Aircraft Cockpit, in: Proceedings of the 2012 Conference on Ergonomie Et Interaction Homme-Machine, Ergo'IHM '12. ACM, New York, NY, USA, pp. 9:9–9:16. <https://doi.org/10.1145/2652574.2653402>

Barbé, J., Wolff, M., Mollard, R., 2013. Human Centered Design Approach to Integrate Touch Screen in Future Aircraft Cockpits, in: Kurosu, M. (Ed.), Human-Computer Interaction. Interaction Modalities and Techniques. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 429–438. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39330-3_45

Barré, J., Mollard, R., Wolff, M., 2014. Ergonomic approaches to integrate touch screen in future aircraft cockpits. J. Eur. Systèmes Autom. 48, 303–318. <https://doi.org/10.3166/jesa.48.303-318>

Barstow, D., 2012. The aviation iPad revolution. J. Air Traffic Control 54.

Baudrillard, J., Nouvel, J., 2000. Les objets singuliers. Architecture et philosophie. Calmann-Lévy, Paris.

Becouarn, L., 2012. Final Report - ODICIS (One DIspay for a Cockpit Interactive Solution) | Publication [WWW Document]. CORDIS Eur. Comm. URL https://cordis.europa.eu/publication/rcn/14021_en.html (accessed 12.13.18).

Bellotti, F., Gloria, D., Montanari, R., Dosio, N., Morreale, D., 2005. COMUNICAR: Designing a Multimedia, Context-aware Human-machine Interface for Cars. Cogn Technol Work 7, 36–45. <https://doi.org/10.1007/s10111-004-0168-9>

Bergstrom-Lehtovirta, J., Oulasvirta, A., Brewster, S., 2011. The Effects of Walking Speed on Target Acquisition on a Touchscreen Interface, in: Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI '11. ACM, New York, NY, USA, pp. 143–146. <https://doi.org/10.1145/2037373.2037396>

Bernard, F.F., Casset, F., Danel, J., Chappaz, C., Basrour, S., 2015. Characterization of a smartphone size haptic rendering system based on thin-film ALN transduction on glass, in: 26th Micromechanics and Microsystems Europe Workshop (MME'15), Proceedings. Toledo, Spain, pp. 1–4.

Bertin, J., 2013. Sémiologie graphique : Les diagrammes, les réseaux, les cartes. Editions de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris.

Blanch, R., Guiard, Y., Beaudouin-Lafon, M., 2004. Semantic pointing: improving target acquisition with control-display ratio adaptation, in: Proceedings of the 2004 Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '04. Presented at the the 2004 conference, ACM Press, Vienna, Austria, pp. 519–526. <https://doi.org/10.1145/985692.985758>

- Brave, S., Ishii, H., Dahley, A., 1998. Tangible Interfaces for Remote Collaboration and Communication, in: Proceedings of the 1998 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work, CSCW '98. ACM, New York, NY, USA, pp. 169–178. <https://doi.org/10.1145/289444.289491>
- Brooks, R.A., 1991. Intelligence without representation. *Artif. Intell.* 47, 139–159. [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(91\)90053-M](https://doi.org/10.1016/0004-3702(91)90053-M)
- Brown, D.L., Vitense, H.S., Wetzel, P.A., Anderson, G.M., 2002. Instrument scan strategies of F-117A pilots. *Aviat. Space Environ. Med.* 73, 1007–1013.
- Bucher, P., Chatty, S., 2009. Qu'est-ce qu'une surface d'affichage ? Une analyse rétrospective, in: Proceedings of the IHM 2009. Presented at the IHM 2009, ACM Press.
- Buxton, W., Hill, R., Rowley, P., 1985. Issues and Techniques in Touch-Sensitive Tablet Input, in: Proceedings of the 12th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '85). ACM, New York.
- Cadoz, C., 1992. Le geste canal de communication homme/machine: la communication instrumentale, in: Journées AFIA.
- Carbone, M., Dalmasso, A.C., Bodini, J., 2016. Vivre par(mi) les écrans. Les Presses du réel, Dijon.
- Card, S.K., Newell, A., Moran, T.P., 1983. The Psychology of Human-Computer Interaction. L. Erlbaum Associates Inc., Hillsdale, NJ, USA.
- Casner, S.M., Geven, R.W., Recker, M.P., Schooler, J.W., 2014. The Retention of Manual Flying Skills in the Automated Cockpit. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 56, 1506–1516. <https://doi.org/10.1177/0018720814535628>
- Casset, F., Danel, J.S., Renaux, P., Chappaz, C., Le Rhun, G., Dieppedale, C., Gorisse, M., Basrour, S., Fanget, S., Ancey, P., Devos, A., Defay, E., 2014. Characterization and post simulation of thin-film PZT actuated plates for haptic applications, in: 15th IEEE International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE 2014. Ghent, Belgium, p. 4 pages. <https://doi.org/10.1109/EuroSimE.2014.6813769>
- Castillo, J.A.L. del, Couture, N., 2016. The aircraft of the future: towards the tangible cockpit. ACM Press, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1145/2950112.2964582>
- Chapman, D., 1991. Vision, Instruction and Action. MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- Chappaz, C., Vezzoli, E., 2018. Dalle tactile vibrante. FR3061568A1.
- Chatonsky, G., 2008. La répétition des limites diffusion, projection et immersion. *Prolifération Écrans Prolif. Screens* 30.
- Clark, A., 2011. Supersizing the mind: embodiment, action, and cognitive extension. Oxford

University Press, Oxford; New York.

Clement, A., Van den Besselaar, P., 1993. A Retrospective Look at PD Projects. *Commun ACM* 36, 29–37. <https://doi.org/10.1145/153571.163264>

Cockburn, A., Gutwin, C., Palanque, P., Deleris, Y., Trask, C., Coveney, A., Yung, M., MacLean, K., 2017. Turbulent Touch: Touchscreen Input for Cockpit Flight Displays, in: *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17)*. ACM, New York, NY, USA, pp. 6742–6753. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025584>

Cockburn, A., Woolley, D., Thai, K.T.P., Clucas, D., Hoermann, S., Gutwin, C., 2018a. Reducing the Attentional Demands of In-Vehicle Touchscreens with Stencil Overlays, in: *Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '18*. Presented at the the 10th International Conference, ACM Press, Toronto, ON, Canada, pp. 33–42. <https://doi.org/10.1145/3239060.3239061>

Cockburn, A., Woolley, D., Thai, K.T.P., Clucas, D., Hoermann, S., Gutwin, C., 2018b. Reducing the Attentional Demands of In-Vehicle Touchscreens with Stencil Overlays, in: *Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '18*. Presented at the the 10th International Conference, ACM Press, Toronto, ON, Canada, pp. 33–42. <https://doi.org/10.1145/3239060.3239061>

Coelho, M., Zigelbaum, J., 2011. Shape-changing interfaces. *Pers. Ubiquitous Comput.* 15, 161–173. <https://doi.org/10.1007/s00779-010-0311-y>

Cohen, P.R., McGee, D.R., 2004. Tangible multimodal interfaces for safety-critical applications. *Commun. ACM* 47, 41–46.

Colley, A., Virtanen, L., Ojala, T., Häkkinä, J., 2016. Guided touch screen: enhanced eyes-free interaction, in: *Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Pervasive Displays - PerDis '16*. Presented at the the 5th ACM International Symposium, ACM Press, Oulu, Finland, pp. 80–86. <https://doi.org/10.1145/2914920.2915008>

Coutaz, J., Lachenal, C., Bérard, F., Barralon, N., 2002. Quand les surfaces deviennent interactives..., in: *Les Cahiers du Numérique*. Lavoisier, Paris.

Crawford, M.B., 2016. *Contact: pourquoi nous avons perdu le monde, et comment le retrouver*. La Découverte, Paris.

Dalmaso, A.C., 2018. *Le corps, c'est l'écran : La philosophie du visuel de Merleau-Ponty*. Mimesis, Paris.

Dand, D., Hemsley, R., 2013. Obake: interactions on a 2.5D elastic display, in: *Proceedings of the Adjunct Publication of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '13 Adjunct*. Presented at the the adjunct publication of the 26th annual ACM symposium, ACM Press, St. Andrews, Scotland, United Kingdom, pp. 109–

110. <https://doi.org/10.1145/2508468.2514734>

Degani, A., Wiener, E.L., 1997. Procedures in complex systems: the airline cockpit. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part Syst. Hum. Publ. IEEE Syst. Man Cybern. Soc.* 27, 302–312.

Degani, A., Wiener, E.L., 1993. Cockpit Checklists: Concepts, Design, and Use. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 35, 345–359. <https://doi.org/10.1177/001872089303500209>

Deleuze, G., 1988. *Le pli - Leibniz et le baroque*. Editions de Minuit, Paris.

Deleuze, G., 1985. *Cinéma 2 - L'Image-temps*, Minuit. ed. Paris.

Dietz, P., Leigh, D., 2001. DiamondTouch: A Multi-user Touch Technology, in: *Proceedings of the 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '01*. ACM, New York, NY, USA, pp. 219–226. <https://doi.org/10.1145/502348.502389>

Dismukes, R.K., Berman, B., 2010. Checklists and Monitoring in the Cockpit: Why Crucial Defenses Sometimes Fail. *NASA* 62.

Dodd, S., Lancaster, J., Miranda, A., Grothe, S., DeMers, B., Rogers, B., 2014. Touch Screens on the Flight Deck: The Impact of Touch Target Size, Spacing, Touch Technology and Turbulence on Pilot Performance. *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.* 58, 6–10. <https://doi.org/10.1177/1541931214581002>

Dourish, P., 2004. What we talk about when we talk about context. *Pers. Ubiquitous Comput.* 8, 19–30.

Dourish, P., 2001. *Where the action is: the foundations of embodied interaction*. MIT Press, Cambridge, Mass.

Dutu, L.-C., 2015. *Analyse de signaux vibrotactiles et modèles flous de la perception: application aux interfaces tactiles pour l'automobile et l'aéronautique*. Université Grenoble Alpes.

Ehn, P., 1990. *Work-Oriented Design of Computer Artifacts*. L. Erlbaum Associates Inc., Hillsdale, NJ, USA.

Endsley, M.R., 1995. Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 37, 32–64. <https://doi.org/10.1518/001872095779049543>

Eren, A.L., Burnett, G., Large, D.R., Harvey, C., 2018. Understanding the effects of peripheral vision and muscle memory on in-vehicle touchscreen interactions. *IET Intell. Transp. Syst.* 12, 434–439. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2017.0229>

Fallman, D., 2003. *In romance with the materials of mobile interaction*. Umea University, Sweden.

Fitzmaurice, G.W., Buxton, W., 1997. An empirical evaluation of graspable user interfaces: towards specialized, space-multiplexed input, in: *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, pp. 43–50.

Fitzmaurice, G.W., Ishii, H., Buxton, W.A., 1995. Bricks: laying the foundations for graspable user interfaces, in: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 442–449.

Follmer, S., Leithinger, D., Olwal, A., Hogge, A., Ishii, H., 2013. inFORM: dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation. *ACM Press*, pp. 417–426. <https://doi.org/10.1145/2501988.2502032>

Fraisse, P., 1957. *Psychologie du temps* : Par Paul Fraisse. Bibliothèque scientifique internationale. section Psychologie.

Fuller, H., Tsimhoni, O., Reed, M.P., 2008. Effect of In-Vehicle Touch Screen Position on Driver Performance. *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.* 52, 1893–1897. <https://doi.org/10.1177/154193120805202313>

Gallant, D.T., Seniuk, A.G., Vertegaal, R., 2008. Towards More Paper-like Input: Flexible Input Devices for Foldable Interaction Styles, in: *Proceedings of the 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '08*. ACM, New York, NY, USA, pp. 283–286. <https://doi.org/10.1145/1449715.1449762>

Garcia-Ruiz, M.A. (Ed.), 2013. *Cases on Usability Engineering: Design and Development of Digital Products, Advances in Human and Social Aspects of Technology*. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-4046-7>

Garcia-Sanjuan, F., Jaen, J., Nacher, V., 2016. Toward a General Conceptualization of Multi-Display Environments. *Front. ICT* 3. <https://doi.org/10.3389/fict.2016.00020>

Gaver, W.W., 1992. The affordances of media spaces for collaboration, in: *Proceedings of the 1992 ACM Conference on Computer-Supported Cooperative Work - CSCW '92*. Presented at the the 1992 ACM conference, ACM Press, Toronto, Ontario, Canada, pp. 17–24. <https://doi.org/10.1145/143457.371596>

Gaver, W.W., 1991. Technology Affordances, in: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '91*. ACM, New York, NY, USA, pp. 79–84. <https://doi.org/10.1145/108844.108856>

Gibb, R., Ercoline, B., Scharff, L., 2011. Spatial Disorientation: Decades of Pilot Fatalities. *Aviat. Space Environ. Med.* 82, 717–724. <https://doi.org/10.3357/ASEM.3048.2011>

Gibson, J., 1966. *The Senses Considered as Perceptual Systems*, Revised ed. edition. ed. Houghton Mifflin, Boston.

Gibson, J.J., 1979. *The Ecological Approach to Visual Perception*, 1 edition. ed. Routledge, New York, London.

- Glaholt, M.G., Reingold, E.M., 2009. The time course of gaze bias in visual decision tasks. *Vis. Cogn.* 17, 1228–1243. <https://doi.org/10.1080/13506280802362962>
- Göbel, F., Giannopoulos, I., Raubal, M., 2016. The importance of visual attention for adaptive interfaces, in: *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services Adjunct (MobileHCI '16)*. ACM, New York, NY, USA, pp. 930–935. <https://doi.org/10.1145/2957265.2962659>
- Gomes, A., Nesbitt, A., Vertegaal, R., 2013. MorePhone: a study of actuated shape deformations for flexible thin-film smartphone notifications, in: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, pp. 583–592.
- Gomes, A., Vertegaal, R., 2014. Paperfold: A Shape Changing Mobile Device with Multiple Reconfigurable Electrophoretic Magnetic Display Tiles, in: *CHI '14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '14*. ACM, New York, NY, USA, pp. 535–538. <https://doi.org/10.1145/2559206.2574770>
- Götzelmann, T., 2018. Visually Augmented Audio-Tactile Graphics for Visually Impaired People. *ACM Trans. Access. Comput.* 11, 1–31. <https://doi.org/10.1145/3186894>
- Goulet, P., Nouvel, J., 1987. catalogue d'exposition à l'Institut français d'Architecture. Electa Moniteur, Paris.
- Greenberg, C., Gintz, C., 1979. Regards sur l'art américain des années soixante : Anthologie critique. Ed. Territoires.
- Grønbaek, J.E., Korsgaard, H., Petersen, M.G., Birk, M.H., Krogh, P.G., 2017. Proxemic Transitions: Designing Shape-Changing Furniture for Informal Meetings, in: *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '17*. ACM, New York, NY, USA, pp. 7029–7041. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025487>
- Han, J.Y., 2005. Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection. Presented at the *Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology*, ACM, pp. 115–118. <https://doi.org/10.1145/1095034.1095054>
- Hansen, M.B.N., 2006. *New Philosophy for New Media*, 1st edition thus edition. ed. The MIT Press, Cambridge, Mass.
- Harrington, K., Large, D.R., Burnett, G., Georgiou, O., 2018. Exploring the Use of Mid-Air Ultrasonic Feedback to Enhance Automotive User Interfaces, in: *Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '18*. Presented at the the 10th International Conference, ACM Press, Toronto, ON, Canada, pp. 11–20. <https://doi.org/10.1145/3239060.3239089>
- Harrison, C., Hudson, S.E., 2009. Providing dynamically changeable physical buttons on a visual display, in: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, pp. 299–308.
- Hart, S.G., 2006. Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. *Proc. Hum. Factors*

Ergon. Soc. Annu. Meet. 50, 904–908. <https://doi.org/10.1177/154193120605000909>

Hart, S.G., Staveland, L.E., 1988. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research, in: Hancock, P.A., Meshkati, N. (Eds.), *Advances in Psychology, Human Mental Workload*. North-Holland, pp. 139–183. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)

Helmholtz, H. von, 1867. *Handbuch der physiologischen Optik*. Leipzig : Leopold Voss.

Helmreich, R.L., Merritt, A.C., Wilhelm, J.A., 1999. The Evolution of Crew Resource Management Training in Commercial Aviation. *Int. J. Aviat. Psychol.* 9, 19–32. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0901_2

Hemmert, F., Joost, G., Knörig, A., Wettach, R., 2008. Dynamic knobs: shape change as a means of interaction on a mobile phone, in: *CHI'08 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. ACM, pp. 2309–2314.

Hinckley, K., Dixon, M., Sarin, R., Guimbretiere, F., Balakrishnan, R., 2009. Codex: a dual screen tablet computer. Presented at the Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM, pp. 1933–1942. <https://doi.org/10.1145/1518701.1518996>

Holman, D., Vertegaal, R., Altosaar, M., Troje, N., Johns, D., 2005. Paper windows: interaction techniques for digital paper, in: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '05*. Presented at the the SIGCHI conference, ACM Press, Portland, Oregon, USA, p. 591. <https://doi.org/10.1145/1054972.1055054>

Hooey, B.L., Gore, B.F., Wickens, C.D., Scott-Nash, S., Socash, C., Salud, E., Foyle, D.C., 2011. Modeling Pilot Situation Awareness, in: Cacciabue, P.C., Hjälm Dahl, M., Luedtke, A., Riccioli, C. (Eds.), *Human Modelling in Assisted Transportation*. Springer Milan, Milano, pp. 207–213. https://doi.org/10.1007/978-88-470-1821-1_22

Hornecker, E., 2009. Encyclopedia entry on tangible interaction [WWW Document]. URL <https://www.interaction-design.org/literature/book/the-glossary-of-human-computer-interaction/tangible-interaction> (accessed 3.13.19).

Hornecker, E., Buur, J., 2006. Getting a grip on tangible interaction: a framework on physical space and social interaction, in: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, pp. 437–446.

Hourlier, S., 2015. Human Factors Drivers Behind Next Generation AV2020 Cockpit Display (SAE Technical Paper No. 2015- 01–2537). SAE International, Warrendale, PA. <https://doi.org/10.4271/2015-01-2537>

Hourlier, S., Guerard, S., Servantie, X., 2019. Avionics touch screen in turbulence: simulator design and selected human-machine interface metrics. *Adv. Aviat. Psychol.* 3, 21.

Hutchins, E., 1995. How a cockpit remembers its speeds. *Cogn. Sci.* 19, 265–288.

Hutchins, E., Palen, L., 1997. Constructing meaning from space, gesture, and speech, in: *Discourse, Tools and Reasoning*. Springer, pp. 23–40.

Ishii, H., 2008. Tangible bits: beyond pixels, in: *Proceedings of the 2nd International Conference on Tangible and Embedded Interaction - TEI '08*. Presented at the the 2nd international conference, ACM Press, Bonn, Germany, p. xv. <https://doi.org/10.1145/1347390.1347392>

Ishii, H., Lakatos, D., Bonanni, L., Labrune, J.-B., 2012. Radical Atoms: Beyond Tangible Bits, Toward Transformable Materials. *interactions* 19, 38–51. <https://doi.org/10.1145/2065327.2065337>

Ishii, H., Leithinger, D., Follmer, S., Zoran, A., Schoessler, P., Counts, J., 2015. TRANSFORM: Embodiment of “Radical Atoms” at Milano Design Week, in: *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems - CHI EA '15*. Presented at the the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts, ACM Press, Seoul, Republic of Korea, pp. 687–694. <https://doi.org/10.1145/2702613.2702969>

Ishii, H., Ullmer, B., 1997. Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces Between People, Bits and Atoms, in: *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '97*. ACM, New York, NY, USA, pp. 234–241. <https://doi.org/10.1145/258549.258715>

Iwata, H., Yano, H., Nakaizumi, F., Kawamura, R., 2001. Project FEELEX: adding haptic surface to graphics. Presented at the Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM, pp. 469–476. <https://doi.org/10.1145/383259.383314>

Izadi, S., Hodges, S., Butler, A., Rustemi, A., Buxton, B., 2007. ThinSight: integrated optical multi-touch sensing through thin form-factor displays, in: *Proceedings of the 2007 Workshop on Emerging Displays Technologies Images and beyond: The Future of Displays and Interacton - EDT '07*. Presented at the the 2007 workshop, ACM Press, San Diego, California, pp. 6-es. <https://doi.org/10.1145/1278240.1278246>

Jacob, R.J., 1993. Eye movement-based human-computer interaction techniques: Toward non-command interfaces. *Adv. Hum.-Comput. Interact.* 4, 151–190.

Jacob, R.J.K., Girouard, A., Hirshfield, L.M., Horn, M.S., Shaer, O., Solovey, E.T., Zigelbaum, J., 2008. Reality-based interaction: a framework for post-WIMP interfaces, in: *Proceeding of the Twenty-Sixth Annual CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '08*. Presented at the Proceeding of the twenty-sixth annual CHI conference, ACM Press, Florence, Italy, p. 201. <https://doi.org/10.1145/1357054.1357089>

Jacquier-Bret, J., Gorce, P., Motti Lilian, G., Vigouroux, N., 2017. Biomechanical analysis of upper limb during the use of touch screen: motion strategies identification. *Ergonomics* 60, 358–365. <https://doi.org/10.1080/00140139.2016.1175671>

Jansen, Y., Dragicevic, P., Fekete, J.-D., 2012. Tangible remote controllers for wall-size

displays, in: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, pp. 2865–2874.

Jansen, Y., Karrer, T., Borchers, J., 2010. MudPad: tactile feedback and haptic texture overlay for touch surfaces, in: ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces - ITS '10. Presented at the ACM International Conference, ACM Press, Germany, p. 11. <https://doi.org/10.1145/1936652.1936655>

Johnson, E.A., 1967. Touch Displays: A Programmed Man-Machine Interface. *Ergonomics* 10, 271–277. <https://doi.org/10.1080/00140136708930868>

Johnson, E.A., 1965. Touch display—a novel input/output device for computers. *Electron. Lett.* 1, 219–220. <https://doi.org/10.1049/el:19650200>

Kane, S.K., Morris, M.R., Wobbrock, J.O., 2013. Touchplates: Low-cost Tactile Overlays for Visually Impaired Touch Screen Users, in: Proceedings of the 15th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility, ASSETS '13. ACM, New York, NY, USA, pp. 22:1–22:8. <https://doi.org/10.1145/2513383.2513442>

Kasarskis, P., Stehwien, J., Hickox, J., Aretz, A., States, U., Academy, A.F., Wickens, C., 2001. Comparison of expert and novice scan behaviors during vfr flight, in: In Proceedings of the 11th International Symposium on Aviation Psychology.

Khalilbeigi, M., Lissermann, R., Kleine, W., Steimle, J., 2012. FoldMe: Interacting with Double-sided Foldable Displays, in: Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction, TEI '12. ACM, New York, NY, USA, pp. 33–40. <https://doi.org/10.1145/2148131.2148142>

Khalilbeigi, M., Lissermann, R., Mühlhäuser, M., Steimle, J., 2011. Xpaaand: Interaction Techniques for Rollable Displays, in: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '11. ACM, New York, NY, USA, pp. 2729–2732. <https://doi.org/10.1145/1978942.1979344>

Kim, H., Coutrix, C., Roudaut, A., 2018. Morphees+: Studying Everyday Reconfigurable Objects for the Design and Taxonomy of Reconfigurable UIs, in: Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18). ACM. <https://doi.org/10.1145/3173574.3174193>

Kim, H., Coutrix, C., Roudaut, A., 2016. KnobSlider: Conception d'un Dispositif Déformable Répondant aux Besoins des Utilisateurs, in: Actes de La 28ième Conférence Franco-phone Sur l'Interaction Homme-Machine. pp. 91–102.

Kincaid, R., 2012. Tactile Guides for Touch Screen Controls, in: Proceedings of the 26th Annual BCS Interaction Specialist Group Conference on People and Computers, BCS-HCI '12. British Computer Society, Swinton, UK, UK, pp. 339–344.

Kirsh, D., 1995. The intelligent use of space. *Artificial Intell.* 73, 31–68.

Koffka, K., 1922. Perception: an introduction to the Gestalt-Theorie. *Psychol. Bull.* 19, 531–

585. <https://doi.org/10.1037/h0072422>

Koh, J.T.K.V., Karunanayaka, K., Sepulveda, J., Tharakan, M.J., Krishnan, M., Cheok, A.D., 2010. Liquid interface: a malleable, transient, direct-touch interface, in: Proceedings of the 7th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE '10). ACM, New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1145/1998376.1998378>

Köhler, W., 1920. Die physischen Gestalten in Ruhe und im stationären Zustand: Eine natur-philosophische Untersuchung. Vieweg+Teubner Verlag.

Koleva, B., Benford, S., Ng, K.H., Rodden, T., 2003. A Framework for Tangible User Interfaces, in: Workshop-Proceedings on Real World User Interfaces, Mobile HCI Conference 03. ACM, p. 6.

Lahey, B., Girouard, A., Burleson, W., Vertegaal, R., 2011. PaperPhone: Understanding the Use of Bend Gestures in Mobile Devices with Flexible Electronic Paper Displays, in: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '11. ACM, New York, NY, USA, pp. 1303–1312. <https://doi.org/10.1145/1978942.1979136>

Lakoff, G., Nuñez, R., 2001. Where Mathematics Come From: How The Embodied Mind Brings Mathematics Into Being, 1st edition. ed. Basic Books, New York, NY.

Large, D.R., Crundall, E., Burnett, G., Skrypchuk, L., 2015. Predicting the visual demand of finger-touch pointing tasks in a driving context, in: Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '15. Presented at the the 7th International Conference, ACM Press, Nottingham, United Kingdom, pp. 221–224. <https://doi.org/10.1145/2799250.2799256>

Latorella, K., Pliske, R., Hutton, R., Chrenka, J., 2001. Cognitive Task Analysis of Business Jet Pilots' Weather Flying Behaviors: Preliminary Results: (587602011-001). <https://doi.org/10.1037/e587602011-001>

Le Pape, M.A., Vatrapu, R.K., 2009. An experimental study of field dependency in altered Gz environments, in: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, pp. 1255–1264.

Leatherbarrow, D., Mostafavi, M., 2005. Surface architecture. MIT Press, Cambridge; London.

Lee, J.C., Hudson, S.E., Tse, E., 2008. Foldable Interactive Displays, in: Proceedings of the 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '08. ACM, New York, NY, USA, pp. 287–290. <https://doi.org/10.1145/1449715.1449763>

Lefrancois, O., Matton, N., Gourinat, Y., Peysakhovich, V., Causse, M., 2016. The role of Pilots' monitoring strategies in flight performance, in: European Association for Aviation Psychology Conference EAAP32. Portugal.

Leithinger, D., Follmer, S., Olwal, A., Ishii, H., 2014. Physical telepresence: shape capture and display for embodied, computer-mediated remote collaboration, in: Proceedings of the

27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '14. Presented at the the 27th annual ACM symposium, ACM Press, Honolulu, Hawaii, USA, pp. 461–470. <https://doi.org/10.1145/2642918.2647377>

Leithinger, D., Lakatos, D., DeVincenzi, A., Blackshaw, M., Ishii, H., 2011. Direct and gestural interaction with relief: a 2.5D shape display, in: Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '11. Presented at the the 24th annual ACM symposium, ACM Press, Santa Barbara, California, USA, p. 541. <https://doi.org/10.1145/2047196.2047268>

Lellouche, G., 1996. Une théorie de l'écran. Travers. Cent. Natl. D'art Cult. Georges-Pompidou.

Letondal, C., Castet, J., Vinot, J.-L., De La Rivière, J.-B., Pauchet, S., 2014. Exploring the Physical Design Space for Situation Awareness and Performance in the Interactive Cockpit, in: TEI 2014, 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction. Munich, Germany.

Letondal, C., Vinot, J.-L., Pauchet, S., Boussiron, C., Rey, S., Becquet, V., Lavenir, C., 2018. Being in the Sky: Framing Tangible and Embodied Interaction for Future Airliner Cockpits, in: Proceedings of the Twelfth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction - TEI '18. Presented at the the Twelfth International Conference, ACM Press, Stockholm, Sweden, pp. 656–666. <https://doi.org/10.1145/3173225.3173229>

Lim, Y., Gardi, A., Sabatini, R., Ramasamy, S., Kistan, T., Ezer, N., Vince, J., Bolia, R., 2018. Avionics Human-Machine Interfaces and Interactions for manned and unmanned aircraft. Prog. Aerosp. Sci. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.05.002>

Lin, C.J., Liu, C.N., Chao, C.J., Chen, H.J., 2010. The performance of computer input devices in a vibration environment. Ergonomics 53, 478–490. <https://doi.org/10.1080/00140130903528186>

Loke, L., Robertson, T., 2011. The lived body in design: mapping the terrain, in: Proceedings of the 23rd Australian Computer-Human Interaction Conference on - OzCHI '11. Presented at the the 23rd Australian Computer-Human Interaction Conference, ACM Press, Canberra, Australia, pp. 181–184. <https://doi.org/10.1145/2071536.2071565>

Loomis, J.M., Lederman, S.J., 1986. Tactual perception, in: Handbook of Perception and Human Performance, Vol. 2: Cognitive Processes and Performance. John Wiley & Sons, Oxford, England, pp. 1–41.

Loos, A., 1979. Paroles dans le vide - Malgré tout. Ivrea, Paris.

Loukopoulos, L.D., Dismukes, R.K., Barshi, I., 2001. Cockpit interruptions and distractions: A line observation study, in: Proceedings of the 11th International Symposium on Aviation Psychology. Ohio State University Press Columbus, pp. 1–6.

Lucchi, A., Jermann, P., Zufferey, G., Dillenbourg, P., 2010. An empirical evaluation of touch and tangible interfaces for tabletop displays, in: Proceedings of the Fourth

International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction - TEI '10. Presented at the the fourth international conference, ACM Press, Cambridge, Massachusetts, USA, p. 177. <https://doi.org/10.1145/1709886.1709917>

Luciani, A., Cadoz, C., 2007. Enaction and Enactive Interfaces: A Handbook of Terms. Enactive Systems Books.

Mackay, W.E., 1999. Is paper safer? The role of paper flight strips in air traffic control. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 6, 311–340. <https://doi.org/10.1145/331490.331491>

Mackay, W.E., Fayard, A.-L., 1997. HCI, Natural Science and Design: A Framework for Triangulation Across Disciplines, in: *Proceedings of the 2Nd Conference on Designing Interactive Systems: Processes, Practices, Methods, and Techniques, DIS '97*. ACM, New York, NY, USA, pp. 223–234. <https://doi.org/10.1145/263552.263612>

Mackay, W.E., Fayard, A.-L., Frobert, L., Médini, L., 1998. Reinventing the familiar: exploring an augmented reality design space for air traffic control, in: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '98*. Presented at the the SIGCHI conference, ACM Press, Los Angeles, California, United States, pp. 558–565. <https://doi.org/10.1145/274644.274719>

Mackenzie, G.G., 2014. Eye tracking in the cockpit: a review of the relationships between eye movements and the aviator's cognitive state (Scientific report of Defence Research and Development Canada).

Magnaudet, M., Chatty, S., Conversy, S., Leriche, S., Picard, C., Prun, D., 2018. Djnn/Smala: A Conceptual Framework and a Language for Interaction-Oriented Programming. *Proc ACM Hum-Comput Interact* 2, 12:1–12:27. <https://doi.org/10.1145/3229094>

Matton, N., Vrignaud, C., Rouillard, Y., Lemarié, J., 2018. Learning flight procedures by enacting and receiving feedback. *Appl. Ergon.* 70, 253–259. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.03.009>

Mcavinnay, P., 1986. The Sensor Frame - a gesture-based device for the manipulation of graphic objects, in: *Scinapse*. Carnegie-Mellon University, Pittsburgh.

McBeath, M.K., Shaffer, D.M., work(s):, M.K.K.R., 1995. How Baseball Outfielders Determine Where to Run to Catch Fly Balls. *Sci. New Ser.* 268, 569–573.

McGlone, F., Wessberg, J., Olausson, H., 2014. Discriminative and affective touch: sensing and feeling. *Neuron* 82, 737–755. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2014.05.001>

Mehta, N., 1982. A Flexible Machine Interface. University of Toronto, Canada.

Merleau-Ponty, M., 1988. *L'oeil et l'esprit*. Gallimard, Paris.

Merleau-Ponty, M., 1968. *L'union de l'âme et du corps chez Malebranche, Biran et Bergson*. Vrin.

- Merleau-Ponty, M., 1945. *Phénoménologie de la perception*. Gallimard.
- Merleau-Ponty, M., 1942. *La structure du comportement*, 4e édition. ed. Presses Universitaires de France - PUF.
- Miruchna, V., Walter, R., Lindlbauer, D., Lehmann, M., von Klitzing, R., Müller, J., 2015. GelTouch: Localized Tactile Feedback Through Thin, Programmable Gel, in: *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology (UIST '15)*. ACM, pp. 3–10. <https://doi.org/10.1145/2807442.2807487>
- Moir, I., Seabridge, A., Jukes, M., 2013. Flight Deck Displays, in: *Civil Avionics Systems*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 449–510. <https://doi.org/10.1002/9781118536704.ch12>
- Mone, G., 2013. The Future is Flexible Displays. *Commun ACM* 56, 16–17. <https://doi.org/10.1145/2461256.2461263>
- Muller-Tomfelde, C., Wessels, A., Schremmer, C., 2008. Tilted tabletops: In between horizontal and vertical workspaces, in: *2008 3rd IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human Computer Systems*. Presented at the 2008 3rd IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human Computer Systems, pp. 49–56. <https://doi.org/10.1109/TABLETOP.2008.4660183>
- Nagaraju, S., 2013. Novel User Interaction Styles with Flexible/Rollable Screens, in: *Proceedings of the Biannual Conference of the Italian Chapter of SIGCHI, CHIItaly '13*. ACM, New York, NY, USA, pp. 20:1–20:7. <https://doi.org/10.1145/2499149.2499152>
- Nevile, M., 2004. *Beyond the Black Box: Talk-In-Interaction in the Airline Cockpit*. Ashgate Pub Ltd, Aldershot, Hants, England ; Burlington, VT.
- Ng, A., Brewster, S., 2017. An Evaluation of Touch and Pressure-Based Scrolling and Haptic Feedback for In-Car Touchscreens, in: *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '17*. Presented at the the 9th International Conference, ACM Press, Oldenburg, Germany, pp. 11–20. <https://doi.org/10.1145/3122986.3122997>
- Ng, A., Brewster, S.A., 2016. Investigating Pressure Input and Haptic Feedback for In-Car Touchscreens and Touch Surfaces, in: *Proceedings of the 8th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - Automotive'UI 16*. Presented at the the 8th International Conference, ACM Press, Ann Arbor, MI, USA, pp. 121–128. <https://doi.org/10.1145/3003715.3005420>
- Ng, A., Brewster, S.A., Beruscha, F., Krautter, W., 2017. An Evaluation of Input Controls for In-Car Interactions, in: *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '17*. Presented at the the 2017 CHI Conference, ACM Press, Denver, Colorado, USA, pp. 2845–2852. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025736>
- Noë, A., 2004. *Action in perception*. MIT, Cambridge, Mass.; London.
- Norman, D., 1988. *The Design of Everyday Things: Revised and Expanded Edition*, 2nd

edition. ed. Basic Books, New York, New York.

Noy, Y.I., Lemoine, T.L., Klachan, C., Burns, P.C., 2004. Task interruptability and duration as measures of visual distraction. *Appl. Ergon.* 35, 207–213. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2003.11.012>

O’Sullivan, D., Igoe, T., 2004. *Physical Computing*, 1st edition. ed. Thomson, Boston.

Oviatt, S., Cohen, P., 2000. Perceptual user interfaces: multimodal interfaces that process what comes naturally. *Commun. ACM* 43, 45–53. <https://doi.org/10.1145/330534.330538>

Paik, J.K., An, B., Rus, D., Wood, R.J., 2011. Robotic origamis: self-morphing modular robots, in: 2nd International Conference on Morphological Computation (ICMC2011). Itale, p. 3.

Pastorelli, I., 2007. Environnements instables et cognition: une revue de littérature, in: *ORIANE 4ème colloque national sur le risque*. Biarritz.

Peschke, J., Göbel, F., Gründer, T., Keck, M., Kammer, D., Groh, R., 2012. DepthTouch: An Elastic Surface for Tangible Computing, in: *Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces, AVI ’12*. ACM, New York, NY, USA, pp. 770–771. <https://doi.org/10.1145/2254556.2254706>

Pitts, M.J., Williams, M.A., Wellings, T., Attridge, A., 2009. Assessing subjective response to haptic feedback in automotive touchscreens, in: *Proceedings of the 1st International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI ’09*. Presented at the the 1st International Conference, ACM Press, Essen, Germany, p. 11. <https://doi.org/10.1145/1620509.1620512>

Poupyrev, I., Nashida, T., Maruyama, S., Rekimoto, J., Yamaji, Y., 2004. Lumen: Interactive Visual and Shape Display for Calm Computing, in: *ACM SIGGRAPH 2004 Emerging Technologies, SIGGRAPH ’04*. ACM, New York, NY, USA, pp. 17–. <https://doi.org/10.1145/1186155.1186173>

Prsa, M., Morandell, K., Cuenu, G., Huber, D., 2019. Feature-selective encoding of substrate vibrations in the forelimb somatosensory cortex. *Nature* 567, 384. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1015-8>

Qvarfordt, P., 2017. Gaze-informed multimodal interaction. Presented at the *The Handbook of Multimodal-Multisensor Interfaces*, Association for Computing Machinery and Morgan & Claypool, pp. 365–402. <https://doi.org/10.1145/3015783.3015794>

Raby, M., Wickens, C.D., 1994. Strategic Workload Management and Decision Biases in Aviation. *Int. J. Aviat. Psychol.* 4, 211–240. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0403_2

Ramakers, R., Schöning, J., Luyten, K., 2014. Paddle: highly deformable mobile devices with physical controls, in: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI ’14)*. ACM, pp. 2569–2578. <https://doi.org/10.1145/2556288.2557340>

Rasmussen, M.K., Pedersen, E.W., Petersen, M.G., Hornbæk, K., 2012. Shape-changing interfaces: a review of the design space and open research questions, in: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, pp. 735–744.

Rayner, K., 1998. Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychol. Bull.* 124, 372–422.

Reddy, M., Dourish, P., 2002. A Finger on the Pulse: Temporal Rhythms and Information Seeking in Medical Work 10.

Reingold, E.M., Reichle, E.D., Glaholt, M.G., Sheridan, H., 2012. Direct lexical control of eye movements in reading: evidence from a survival analysis of fixation durations. *Cognit. Psychol.* 65, 177–206. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2012.03.001>

Rekimoto, J., 2002. SmartSkin: An Infrastructure for Freehand Manipulation on Interactive Surfaces, in: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '02. ACM, New York, NY, USA, pp. 113–120. <https://doi.org/10.1145/503376.503397>

Rekimoto, J., Ullmer, B., Oba, H., 2001. DataTiles: a modular platform for mixed physical and graphical interactions, in: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '01. Presented at the the SIGCHI conference, ACM Press, Seattle, Washington, United States, pp. 269–276. <https://doi.org/10.1145/365024.365115>

Revesz, G., 1950. Psychology and art of the blind. Longmans, Green.

Richter, H., Ecker, R., Deisler, C., Butz, A., 2010. HapTouch and the 2+1 state model: potentials of haptic feedback on touch based in-vehicle information systems, in: Proceedings of the 2nd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI '10). ACM.

Rivière, G., 2009. Interaction Tangible sur Table Interactive: application aux géosciences. Bordeaux.

Robertson, T., 1997. Cooperative Work and Lived Cognition: A Taxonomy of Embodied Actions, in: Proceedings of the Fifth European Conference on Computer Supported Cooperative Work. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 205–220. https://doi.org/10.1007/978-94-015-7372-6_14

Robinson, S., Coutrix, C., Pearson, J., Rosso, J., Torquato, M.F., Nigay, L., Jones, M., 2016. Emmergeables: Deformable Displays for Continuous Eyes-Free Mobile Interaction, in: Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '16). ACM, pp. 3793–3805. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858097>

Roo, J.S., Hachet, M., 2017. One Reality: Augmenting How the Physical World is Experienced by combining Multiple Mixed Reality Modalities, in: Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '17. Presented at the the 30th Annual ACM Symposium, ACM Press, Quebec City, QC, Canada, pp. 787–795. <https://doi.org/10.1145/3126594.3126638>

Roth, W.-M., Mavin, T.J., Munro, I., 2015. How a cockpit forgets speeds (and speed-related events): toward a kinetic description of joint cognitive systems. *Cogn. Technol. Work* 17, 279–299. <https://doi.org/10.1007/s10111-014-0292-0>

Roudaut, A., Karnik, A., Löchtefeld, M., Subramanian, S., 2013. Morphees: toward high shape resolution in self-actuated flexible mobile devices, in: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, pp. 593–602.

RTCA EUROCAE Joint Commitees, 2011. RTCA DO-178C Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification.

Salvucci, D.D., Anderson, J.R., 2000. Intelligent Gaze-added Interfaces, in: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '00*. ACM, New York, NY, USA, pp. 273–280. <https://doi.org/10.1145/332040.332444>

Schildbach, B., Rukzio, E., 2010. Investigating selection and reading performance on a mobile phone while walking, in: *Proceedings of the 12th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services - MobileHCI '10*. Presented at the the 12th international conference, ACM Press, Lisbon, Portugal, p. 93. <https://doi.org/10.1145/1851600.1851619>

Schuler, D., Namioka, A. (Eds.), 1993. *Participatory Design: Principles and Practices*. L. Erlbaum Associates Inc., Hillsdale, NJ, USA.

Schultz, K.L., Batten, D.M., Sluchak, T.J., 1998. Optimal viewing angle for touch-screen displays: Is there such a thing? *Int. J. Ind. Ergon.* 22, 343–350. [https://doi.org/10.1016/S0169-8141\(97\)00087-5](https://doi.org/10.1016/S0169-8141(97)00087-5)

Schutte, P.C., Trujillo, A.C., 1996. Flight Crew Task Management in Non-Normal Situations. *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.* 40, 244–248. <https://doi.org/10.1177/154193129604000422>

Schwesig, C., Poupyrev, I., Mori, E., 2003. Gummi: User Interface for Deformable Computers, in: *CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '03)*. ACM, p. 2.

Serim, B., Klouche, K., Jacucci, G., 2017. Gaze-Adaptive Above and On-Surface Interaction, in: *Proceedings of the 2017 Conference on Designing Interactive Systems (DIS '17)*. ACM, pp. 115–127. <https://doi.org/10.1145/3064663.3064744>

Seux, C., 2014. Écran(s). *Le Telemaque* n° 45, 15–25.

Sharman, R., 2016. Nature of Aviation Turbulence, in: Sharman, R., Lane, T. (Eds.), *Aviation Turbulence: Processes, Detection, Prediction*. Springer International Publishing, Cham, pp. 3–30. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23630-8_1

Simondon, G., 2013. *Cours sur la perception (1964-1965)*. Presses universitaires de France, Paris.

Speelpenning, T., Antle, A.N., Doering, T., van den Hoven, E., 2011. Exploring How Tangible Tools Enable Collaboration in a Multi-touch Tabletop Game, in: Proceedings of the 13th IFIP TC 13 International Conference on Human-Computer Interaction - Volume Part II, INTERACT'11. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 605–621.

Stähli, L., Rudi, D., Raubal, M., 2018. Turbulence Ahead - A 3D Web-Based Aviation Weather Visualizer, in: The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '18. Presented at the The 31st Annual ACM Symposium, ACM Press, Berlin, Germany, pp. 299–311. <https://doi.org/10.1145/3242587.3242624>

Steimle, J., Jordt, A., Maes, P., 2013. Flexpad: Highly Flexible Bending Interactions for Projected Handheld Displays, in: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '13. ACM, New York, NY, USA, pp. 237–246. <https://doi.org/10.1145/2470654.2470688>

Suchman, L.A., 1987. Plans and situated actions: the problem of human-machine communication. Cambridge University Press.

Suh, J., Kim, W., Bianchi, A., 2017. Button+: Supporting User and Context Aware Interaction through Shape-Changing Interfaces, in: Proceedings of the Eleventh International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '17). ACM, pp. 261–268. <https://doi.org/10.1145/3024969.3024980>

Suijkerbuijk, M., Rouwhorst, W., Verhoeven, R., Arents, R., 2017. Innovative cockpit touch screen HMI design using Direct Manipulation, in: HFES Annual Conference. p. 15.

Svanæs, D., 2013. Interaction design for and with the lived body: Some implications of merleau-ponty's phenomenology. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 20, 1–30. <https://doi.org/10.1145/2442106.2442114>

Svanæs, D., 2001. Context-Aware Technology: A Phenomenological Perspective. *Human-Computer Interact.* 16, 379–400. https://doi.org/10.1207/S15327051HCI16234_17

Taher, F., Hardy, J., Karnik, A., Weichel, C., Jansen, Y., Hornbæk, K., Alexander, J., 2015. Exploring Interactions with Physically Dynamic Bar Charts, in: Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '15. Presented at the the 33rd Annual ACM Conference, ACM Press, Seoul, Republic of Korea, pp. 3237–3246. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702604>

Takashima, K., Oyama, T., Asari, Y., Sharlin, E., Greenberg, S., Kitamura, Y., 2016. Study and Design of a Shape-Shifting Wall Display, in: Proceedings of the 2016 ACM Conference on Designing Interactive Systems (DIS '16). ACM, pp. 796–806. <https://doi.org/10.1145/2901790.2901892>

Tory, M., Kincaid, R., 2013. Comparing Physical, Overlay, and Touch Screen Parameter Controls, in: Proceedings of the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, ITS '13. ACM, New York, NY, USA, pp. 91–100. <https://doi.org/10.1145/2512349.2512812>

Treisman, A., Gormican, S., 1988. Feature Analysis in Early Vision: Evidence From Search Asymmetries *Psychologie Revue*, 34.

Troiano, G.M., Pedersen, E.W., Hornbæk, K., 2014. User-defined Gestures for Elastic, Deformable Displays, in: *Proceedings of the 2014 International Working Conference on Advanced Visual Interfaces, AVI '14*. ACM, New York, NY, USA, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1145/2598153.2598184>

Tsimhoni, O., Green, P., 2001. Visual Demand of Driving and the Execution of Display-Intensive in-Vehicle Tasks. *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.* 45, 1586–1590.

Ullmer, B., Ishii, H., 2000. Emerging Frameworks for Tangible User Interfaces. *IBM Syst J* 39, 915–931. <https://doi.org/10.1147/sj.393.0915>

Ullmer, B.A., 2002. Tangible interfaces for manipulating aggregates of digital information. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.

van Oosterhout, A., Bruns Alonso, M., Jumisko-Pyykkö, S., 2018. Ripple Thermostat: Affecting the Emotional Experience through Interactive Force Feedback and Shape Change, in: *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18)*. ACM, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1145/3173574.3174229>

Varela, F.J., 1993. *The Embodied Mind – Cognitive Science & Human Experience*, New Ed. ed. MIT Press, Cambridge, Mass.

Vertegaal, R., Poupyrev, I., 2008. Organic user interfaces. *Commun. ACM* 51, 26–44.

Vial, S., 2010. Habiter les interfaces : Usages de la façade et pratiques de la fenêtre en architecture. *Ann. Rech. Urbaine* 106, 160–165. <https://doi.org/10.3406/aru.2010.2792>

Vinot, J.-L., Athenes, S., 2012. Legible, are you sure?: an experimentation-based typographical design in safety-critical context, in: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, pp. 2287–2296.

Vinot, J.-L., Letondal, C., Pauchet, S., Chatty, S., 2016. Could tangibility improve the safety of touch-based interaction?: exploring a new physical design space for pilot-system interfaces, in: *Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace - HCI-Aero '16*. Presented at the the International Conference, ACM Press, Paris, France, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1145/2950112.2964581>

Voelker, S., Matviienko, A., Schöning, J., Borchers, J., 2015a. Combining Direct and Indirect Touch Input for Interactive Workspaces Using Gaze Input, in: *Proceedings of the 3rd ACM Symposium on Spatial User Interaction, SUI '15*. ACM, New York, NY, USA, pp. 79–88. <https://doi.org/10.1145/2788940.2788949>

Voelker, S., Øvergård, K.I., Wacharamanotham, C., Borchers, J., 2015b. Knobology Revisited: A Comparison of User Performance between Tangible and Virtual Rotary Knobs, in: *Proceedings of the 2015 International Conference on Interactive Tabletops & Surfaces - ITS '15*. Presented at the the 2015 International Conference, ACM Press, Madeira, Portugal, pp.

35–38. <https://doi.org/10.1145/2817721.2817725>

Watanabe, Y., Cassinelli, A., Komuro, T., Ishikawa, M., 2008. The deformable workspace: A membrane between real and virtual space, in: 2008 3rd IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human Computer Systems. Presented at the 2008 IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human Computer Systems (TABLETOP), IEEE, Amsterdam, pp. 145–152. <https://doi.org/10.1109/TABLETOP.2008.4660197>

Weiser, M., 1991. The computer for the 21st century, in: ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review. <https://doi.org/10.1145/329124.329126>

Wellner, P., 1993. Interacting with Paper on the DigitalDesk. *Commun ACM* 36, 87–96.

Wiener, E.L., 1993. Crew coordination and training in the advanced-technology cockpit, in: Cockpit Resource Management. Academic Press, San Diego, CA, US, pp. 199–229.

Wikipédia (Ed.), 2018. Rythme.

Wikipédia, 2016. Système critique. Wikipédia.

Wikström, V., Overstall, S., Tahiroğlu, K., Kildal, J., Ahmaniemi, T., 2013. MARSUI: malleable audio-reactive shape-retaining user interface, in: CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems on - CHI EA '13. Presented at the CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, ACM Press, Paris, France, p. 3151.

Wilson, A.D., 2004. TouchLight: An Imaging Touch Screen and Display for Gesture-based Interaction, in: Proceedings of the 6th International Conference on Multimodal Interfaces, ICMI '04. ACM, New York, NY, USA, pp. 69–76. <https://doi.org/10.1145/1027933.1027946>

Wobbrock, J.O., Myers, B.A., Kembel, J.A., 2003. EdgeWrite: a stylus-based text entry method designed for high accuracy and stability of motion, in: Proceedings of the 16th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '03. Presented at the the 16th annual ACM symposium, ACM Press, Vancouver, Canada, pp. 61–70.

Wölfflin, H., Wermester, C., Raymond, M., Raymond, C., 2017. Principes fondamentaux de l'histoire de l'art. Parenthèses Editions.

Yeh, M., Swide, C., Jin Jo, Y., Donovan, C., 2016. Human Factors Considerations in the Design and Evaluation of Flight Deck Displays and Controls. Federal Aviation Administration.

Zammit-Mangion, D., Becouarn, L., Aymeric, B., Fabbri, M., Bader, J., 2011. A Single Interactive Display Concept for Commercial and Business Jet Cockpits, in: 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conferences. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2011-7062>

10 ANNEXES

10.1 VOCABULAIRE AERONAUTIQUE

AFM	Aircraft Flight Manual
CDS	Cockpit Display System
CIDS	Cabin Intercommunication Data System
CPT	Captain
CRM	Crew Ressource Management
ECAM	Electronic Centralized Aircraft Monitoring
EFIS	Electronic Flight Instrument System
EWD	Engine and Warning Display
FAP	Flight Attendant Panel
FCOM	Flight Crew Operating System
FCTM	Flight Crew Training Manual
FMS	Flight Management System
FMT	Flight Management Terminal
FOA	Flight Ops Application
F/O	First Officer
MDU	Multifunction Display Unit
MFD	Multi Functional Display
ND	Navigation Display
OIS	Onboard Information System
PFD	Primary Flight Display
PF	Pilot Flying
PM	Pilot Monitoring
SD	System Display
SOPs	Standard Operating Procedures

10.2 LISTE DES SEANCE D'OBSERVATIONS ET DES ATELIERS DE CONCEPTION PARTICIPATIVES

Date	Type	Pilote
4/03/2016	Observation simulateur ENAC	VD, Transavia – B737
16/03/2016	Observation simulateur ENAC	YR, Ingénieur ENAC
17/03/2016	Observation simulateur ENAC	LSB et JR, certifiés A320
25/03/2016	Interview + Observation simulateur ENAC	VD, Transavia – B737
20/04/2016	Interview + Observation simulateur ENAC	PB, Air France - A320 et B777
13/06/2016	Interview avion léger sur tarmac	LSB - certifié A320
7/07/2016	Mini interview + observation en vol	Équipage Air France – A320
13/10/2016	Interview + mini-atelier prototypage	OL, Air France – A320 et B737
24/11/2016	Interview + atelier prototypage	VD, Transavia – B737
7/12/2016	Interview + atelier prototypage	OL, Air France – A320 et B737
22/02/2017	Atelier brainstorming	LJ, Volotea – A320
24/03/2017	Walkthrough	VD, Transavia – B737
2/04/2017	Walkthrough	OL, Air France – A320 et B737
11/05/2017	Simulateur certifié ENAC	PM, instructeur A320 ENAC
01/06/2017	Walkthrough GazeForm	LSB - certifié A320
11/07/2017	Interview + mini-atelier	DL, instructeur ENAC
23/08/2017	Walkthrough GazeForm	LSB - certifié A320 et SF - Twin-Jet, Beechcraft 1900D
7/09/2017	Walkthrough GazeForm	LJ, Volotea – A320
8/09/2017	Walkthrough GazeForm	PB, Air France - A320 et B777
14/09/2017	Walkthrough GazeForm	OL, Air France – A320 et B737
19/06/2018	Walkthrough Multi-plié prototype 1	VD, Transavia – B737
21/06/2018	Walkthrough Multi-plié prototype 1	LSB - certifié A320 et SF - Twin-Jet, Beechcraft 1900D
26/06/2018	Walkthrough Multi-plié prototype 1	LJ, Volotea – A320
04/07/2018	Walkthrough Multi-plié prototype 1	OL, Air France – A320 et B737
30/08/2018	Walkthrough Multi-plié prototype 2	VD, Transavia – B737
31/08/2018	Walkthrough Multi-plié prototype 2	LSB - certifié A320 et SF - Twin-Jet, Beechcraft 1900D
31/08/2018	Walkthrough Multi-plié prototype 2	OL, Air France – A320 et B737
07/09/2018	Walkthrough Multi-plié prototype 2	LJ, Volotea – A320

10.3 PUBLICATIONS

10.3.1 Articles

Sylvain Pauchet, Jean-Luc Vinot, Catherine Letondal, Alexandre Lemort, Claire Lavenir, Timothée Lecomte, Stéphanie Rey, Valentin Becquet and Guillaume Crouzet. 2019. *Multi-plié: a Linear Foldable and Flattenable Interactive Display to Support Efficiency, Safety and Collaboration. Exploring and Ironing out Design Complexities with Airliner Pilots. In 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems Proceedings (CHI 2019), May 4–9, 2019, Glasgow, Scotland.*

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

Jean-Luc Vinot, **Sylvain Pauchet**, Catherine Letondal. 2019. Interfaces pilotes-systèmes tactiles des cockpits aéronautiques : risques majeurs potentiels pour la sécurité aérienne et apports possibles des TEI (Tangible Embodied Interaction). Entretiens de Toulouse, Apr 2019, Toulouse, France.

<https://hal-enac.archives-ouvertes.fr/hal-02008597v1>

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 *Proceedings of the 2018 on Designing Interactive Systems Conference 2018 - DIS '18*, Hong Kong, China, 2018, p. 1193-1205.

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

Catherine Letondal, 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 Proceedings of the Twelfth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '18)*. ACM, New York, NY, USA, 656-666.

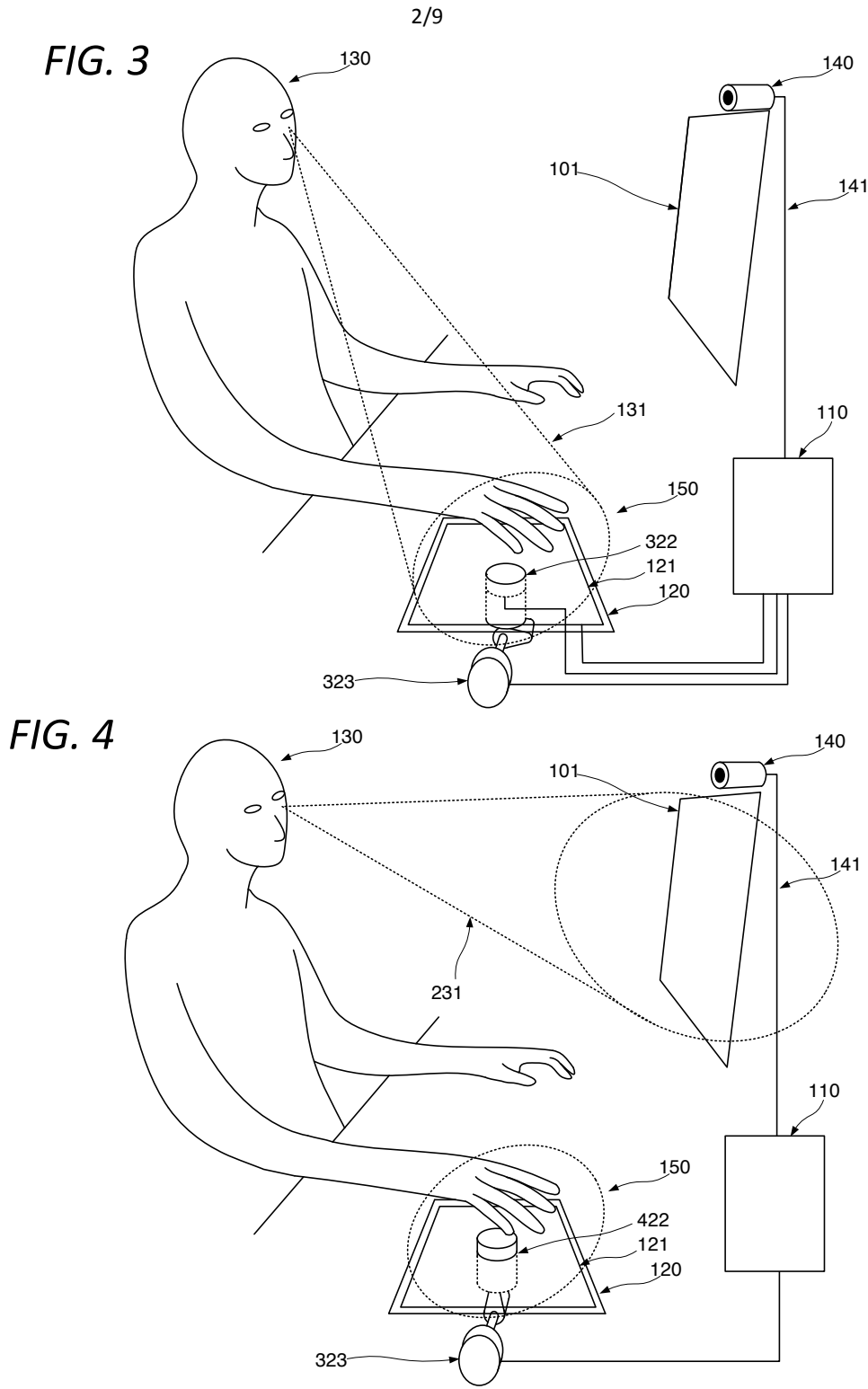
DOI: <https://doi.org/10.1145/3173225.3173229>

Jean-Luc Vinot, Catherine Letondal, **Sylvain Pauchet**, and Stéphane Chatty. 2016. Could tangibility improve the safety of touch-based interaction?: exploring a new physical design space for pilot-system interfaces. *In Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace (HCI-Aero '16)*. ACM, New York, NY, USA, Article 8, 8 pages.

<https://doi.org/10.1145/2950112.2964581>

10.3.2 Brevet

Sylvain Pauchet, Catherine Letondal, Jean-Luc Vinot. System and method for modulation of control interface feedback. France, Patent n° : EP17306543. 2018



10.5 APPLICATION WEB D'ANALYSE DE DONNEES QUALITATIVES

Structure de la base de données relationnelle



Interface de consultation des verbatims

The screenshot shows the Airtius web application interface. On the left is a dark sidebar with the Airtius logo and navigation links: Accueil, Verbatims, and Thèmes - Sous-thèmes. The main content area is titled 'Verbatims' and includes a search bar, a 'Liste des verbatims' section with a table, and a 'Ajouter un verbatim' button. The table has columns for Verbatims, Thèmes, Sous-thèmes, and Actions. It displays several entries with verbatim text and associated themes and sub-themes.

Verbatims	Thèmes	Sous-thèmes	Actions
boutons physiques, boutons proches mais position illogique, piège du physique, interaction sans les yeux : là c'est le piège du physique : la gars il sait que le bouton est là – donc il y avait la caméra avec le bouton [?] le mec il sonnait ... donc le gars prend le bouton, puis il continue à regarder devant lui, et il était là et il se dit, mais pourquoi il ouvre pas la porte le captain ? et en fait, en faisant ça, il trimmait l'avion.	Spatial, Feedback, Formes		Modifier
La main reste sur le bouton rotatif alors que le regard vérifie la vue	Tangible, Feedback, Formes	graspability, toucher, perception/action multimodale	Modifier
là (en montrant l'over head tactile) visuellement il n'y a pas de relief et vous avez pas de bol parce que moi j'ai justement un problème détecté par l'armée de l'air sur la vision du relief. Là j'étais incapable de vous dire si c'était en on ou en off [Geste de préparation et de collaboration]	Tactile, Formes, Gestes, Collaboration	limites du tactile, Guide, armer un geste, contrôle mutuel, acquiescement, conscience mutuelle	Modifier
Quand ça bouge il m'est arrivé de ne pas pouvoir toucher le FCU, les accélérations étaient tellement fortes que l'on arrivait pas à atteindre le FCU et attraper le bouton	Sécurité, Tactile, Gestes, Formes	contexte dégradé, limites du tactile, geste sur dispositif, Guide	Modifier
avec les yeux, ça suffira pas , parce qu'en fait on touche (geste de toucher) la console	Feedback, Gestes		Modifier

Interface d'ajout et de modification de verbatim

The screenshot shows the 'Ajout / Modification Verbatim' form in the Airtius application. The left sidebar contains the navigation menu with 'Accueil', 'Verbatims', and 'Thèmes - Sous-thèmes'. The main content area has a search bar and a title 'Verbatims'. The form itself is titled 'Ajout / Modification Verbatim' and contains several fields: 'Séance / Pilote' (a dropdown menu showing 'Olivier Lefrancois - Air France'), 'Fichier transcription', 'Fichier vidéo/son', 'Timecode', 'Verbatim' (a large text area), 'Contexte', 'Thème' (a dropdown menu showing 'Automatisme', 'Carte', 'Charge cognitive', 'Collaboration'), 'Sous-thème' (a dropdown menu showing 'Automatisme', 'conflit PA / pilote', 'incohérence', 'confiance'), and 'Citation'.

Interface d'administration des thèmes

The screenshot shows the 'Ajouter un thème' and 'Ajouter un sous thème' forms in the Airtius application. The left sidebar contains the navigation menu with 'Accueil', 'Verbatims', and 'Thèmes - Sous-thèmes'. The main content area has a search bar and a title 'Verbatims'. The 'Ajouter un thème' form contains fields for 'Thème' and 'Couleur' (a color picker showing '#e01ab5'). The 'Ajouter un sous thème' form contains fields for 'Thème' (a dropdown menu showing 'Automatisme') and 'Sous-thème'. Both forms have 'Cancel' and 'Submit' buttons. Below the forms is a section titled 'Liste des Thèmes/Sous-thèmes' with a 'Show 50 entries' dropdown, a 'Search' input, and a table with columns 'Thèmes', 'Sous-thèmes', and 'Actions'.

10.6 QUESTIONNAIRES POUR L'EXPÉRIMENTATION GAZEFORM

Participant : _____

Date: ____/____/____ Heure: ____:____

Questionnaire préalable à l'expérimentation GazeForm

Merci de nous fournir les renseignements suivants
(ces données resteront confidentielles).

Nom :

Prénom :

Age :

Sexe :

Gaucher/droitier :

- si vous êtes gaucher, utilisez-vous quand même votre main droite pour la souris
(oui/non) ?

Votre taille :

Lunettes oui/non :

- si oui quel est le type de correction (myopie, astigmatie, ...) :

- et, si vous le savez, votre niveau de correction :

- problème de perception des couleurs ?

- si oui, pouvez-vous voir sans vos lunettes ?

Utilisation d'écrans tactiles (tablette, smartphone, ...) (1 : débutant -> 5 expert) :

Etes-vous un(e) gamer (oui/non) ?

Formation initiale :

Niveau de formation :

Domaine d'activité professionnel :

Si aéronautique, quelle est votre expérience du cockpit :

Participant : _____

Date: ____/____/____ Heure: ____:____

Questionnaire préalable à l'expérimentation GazeForm

Merci de nous fournir les renseignements suivants
(ces données resteront confidentielles).

Nom :

Prénom :

Age :

Sexe :

Gaucher/droitier :

- si vous êtes gaucher, utilisez-vous quand même votre main droite pour la souris
(oui/non) ?

Votre taille :

Lunettes oui/non :

- si oui quel est le type de correction (myopie, astigmatie, ...) :

- et, si vous le savez, votre niveau de correction :

- problème de perception des couleurs ?

- si oui, pouvez-vous voir sans vos lunettes ?

Utilisation d'écrans tactiles (tablette, smartphone, ...) (1 : débutant -> 5 expert) :

Etes-vous un(e) gamer (oui/non) ?

Formation initiale :

Niveau de formation :

Domaine d'activité professionnel :

Si aéronautique, quelle est votre expérience du cockpit :

System Usability Scale : condition tactile

Instructions: Pour chacune des affirmations ci-dessous, cochez la case qui correspond le mieux à votre utilisation du système aujourd'hui.

		Je ne suis pas du tout d'accord			Je suis complètement d'accord	
1.	Je pense que j'aimerais utiliser ce système fréquemment.	☐	☐	☐	☐	☐
2.	J'ai trouvé ce système inutilement complexe.	☐	☐	☐	☐	☐
3.	J'ai trouvé ce système facile à utiliser.	☐	☐	☐	☐	☐
4.	Je pense qu'il y aurait besoin d'aide pour utiliser ce système.	☐	☐	☐	☐	☐
5.	J'ai trouvé les diverses fonctionnalités de ce système très bien intégrées.	☐	☐	☐	☐	☐
6.	Je pense qu'il y a trop d'incohérences dans ce système.	☐	☐	☐	☐	☐
7.	J'imagine que la plupart des gens pourront utiliser ce système sans difficultés.	☐	☐	☐	☐	☐
8.	Je trouve ce système très complexe à utiliser.	☐	☐	☐	☐	☐
9.	J'ai confiance dans l'utilisation de ce système.	☐	☐	☐	☐	☐
10.	J'ai besoin d'apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser ce système.	☐	☐	☐	☐	☐

Exigence mentale

Exigence physique

très faible très élevé

Exigence temporelle

très faible 10 très élevé

Performance

très faible très élevé

Effort

très faible 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 très élevé

Frustration

200

System Usability Scale : condition GazeForm

Instructions: Pour chacune des affirmations ci-dessous, cochez la case qui correspond le mieux à votre utilisation du système aujourd'hui.

		Je ne suis pas du tout d'accord			Je suis complètement d'accord	
1.	Je pense que j'aimerais utiliser ce système fréquemment.	☐	☐	☐	☐	☐
2.	J'ai trouvé ce système inutilement complexe.	☐	☐	☐	☐	☐
3.	J'ai trouvé ce système facile à utiliser.	☐	☐	☐	☐	☐
4.	Je pense qu'il y aurait besoin d'aide pour utiliser ce système.	☐	☐	☐	☐	☐
5.	J'ai trouvé les diverses fonctionnalités de ce système très bien intégrées.	☐	☐	☐	☐	☐
6.	Je pense qu'il y a trop d'incohérences dans ce système.	☐	☐	☐	☐	☐
7.	J'imagine que la plupart des gens pourront utiliser ce système sans difficultés.	☐	☐	☐	☐	☐
8.	Je trouve ce système très complexe à utiliser.	☐	☐	☐	☐	☐
9.	J'ai confiance dans l'utilisation de ce système.	☐	☐	☐	☐	☐
10.	J'ai besoin d'apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser ce système.	☐	☐	☐	☐	☐

NASA TLX : condition GazeForm

Exigence mentale

très faible très élevé

Quelle a été l'importance de l'activité mentale et intellectuelle requise (ex. réflexion, décision, calcul, mémorisation, observation, recherche etc.) ? La tâche vous a-t-elle paru simple, nécessitant peu d'attention (faible) ou complexe, nécessitant beaucoup d'attention (élevée) ?

Exigence physique

très faible très élevé

Quelle a été l'importance de l'activité physique requise (ex. pousser, porter, tourner, marcher, activer, etc.) ? La tâche vous a-t-elle paru facile, peu fatigante, calme (faible) ou pénible, fatigante, active (élevée) ?

Exigence temporelle

très faible très élevé

Quelle a été l'importance de la pression temporelle causée par la rapidité nécessitée pour l'accomplissement de la tâche ? Était-ce un rythme lent et tranquille (faible) ou rapide et précipité (élevé) ?

Performance

très faible très élevé

Quelle réussite pensez-vous avoir eu dans l'accomplissement de votre tâche ? Comment pensez-vous avoir atteint les objectifs déterminés par la tâche ?

Effort

très faible très élevé

Quel degré d'effort avez-vous dû fournir pour exécuter la tâche demandée, (mentalement et physiquement) ?

Frustration

très faible très élevé

Pendant l'exécution du travail vous êtes-vous senti satisfait, relaxé, sûr de vous (niveau de frustration faible), ou plutôt découragé, irrité, stressé, sans assurance (niveau de frustration élevé) ?

Questions sur GazeForm

		Je ne suis pas du tout d'accord			Je suis complètement d'accord	
1.	J'ai compris le système tout de suite.	☐	☐	☐	☐	☐
2.	J'ai été surpris par le comportement du système.	☐	☐	☐	☐	☐
3.	J'aurais préféré un bouton physique permanent.	☐	☐	☐	☐	☐
4.	J'aurais préféré un bouton tactile permanent.	☐	☐	☐	☐	☐
5.	J'ai compris ce qui se passait quand le système changeait le bouton de tactile en physique.	☐	☐	☐	☐	☐
6.	J'ai compris ce qui se passait quand le système changeait le bouton de physique en tactile.	☐	☐	☐	☐	☐
7.	Quand je changeais la direction de mon regard, je voyais que le système s'en rendait compte.	☐	☐	☐	☐	☐
8.	J'aurais préféré décider moi-même si le bouton est physique ou tactile.	☐	☐	☐	☐	☐
9.	Mon bras et mes doigts savaient où aller pour le réglage tactile.	☐	☐	☐	☐	☐
10.	J'ai trouvé plus facile de localiser le bouton physique que la zone tactile quand la position avait changé.	☐	☐	☐	☐	☐
11.	J'ai trouvé plus facile de faire le réglage en physique qu'en tactile.	☐	☐	☐	☐	☐

Vos commentaires sur ce système :

