Interfaces pilotes-systèmes tactiles des cockpits aéronautiques : risques majeurs potentiels pour la sécurité aérienne et apports possibles des TEI (Tangible Embodied Interaction)

Jean-Luc VINOT, enseignant-chercheur en Interaction Homme-Machine,
Catherine LETONDAL, enseignante-chercheure en Interaction Homme-Machine,
Sylvain PAUCHET, doctorant en Interaction Homme-Machine,
équipe de recherche Informatique Interactive de l'ENAC (École Nationale de l'Aviation Civile)

Dans le contexte *Life-critical*[1] du cockpit des avions de ligne, la tendance est de remplacer les interfaces pilotes-systèmes actuelles, qui associent affichage numérique des informations et contrôleurs physiques, par de nouvelles avioniques basées sur l'utilisation de larges surfaces tactiles. Le défi pour l'industrie est de répondre à la complexité croissante des systèmes avec une plus grande flexibilité et des coûts réduits. Les écrans tactiles permettent également des interactions efficaces pour les pilotes, grâce à la manipulation directe des objets [2,5], la plasticité de l'interface, l'adaptabilité au contexte de vol ou une meilleure gestion des ressources cognitives [12,14]. Bien que cette évolution technique offre de nombreux avantages, tant aux pilotes qu'aux constructeurs, la littérature scientifique souligne les sérieux défauts du tactile [1,6,7,8,10,14] qui pourraient limiter considérablement leur utilisation opérationnelle et présenter des risques potentiels majeurs pour la sécurité aérienne.

Nous présentons ici les premiers résultats du projet de recherche ANR AIRTIUS[2], associant deux partenaires académiques, l'ENAC (École Nationale de l'Aviation Civile) et l'ISAE (Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace), et trois partenaires industriels, PME innovantes de la région Occitanie/Pyrénées Méditerranée : Astrolab, Ingenuity i/o et Intactile Design.

Le projet AIRTIUS se fonde sur l'hypothèse qu'une approche mixte des interfaces pilotes-systèmes, visant à « augmenter » le tactile par des interactions tangibles et incarnées (TEI)[3], prendrait mieux en compte les capacités sensori-motrices[4] des pilotes, et permettrait d'identifier et de traiter les problèmes potentiels posés par le tout tactile. L'objectif scientifique central du projet est de construire et d'évaluer cette hypothèse à travers l'exploration d'espaces de design, méthodes, techniques et dispositifs d'interaction pour le cockpit. Son objectif technique principal est de répondre aux besoins industriels d'évolution technologique des interfaces pilotes-systèmes tout en garantissant la sécurité aérienne. Il vise notamment à augmenter le niveau de maturité technologique (TRL) des interactions tangibles dans le cockpit.

1. Cockpits tactiles : challenge industriel et risques potentiels ?

Analyse de l'activité et interfaces pilotes-systèmes du cockpit

Dans le poste de pilotage des avions de ligne, les pilotes assurent collaborativement cinq activités majeures : le pilotage de l'avion (manuel ou pilote automatique), la navigation (gestion et suivi du plan de vol), la surveillance et gestion des systèmes, la communication (avec les contrôleurs aériens ou le support sol) et la gestion de la mission (du vol) pour la compagnie aérienne. L'exploitation d'aéronefs en équipage à deux pilotes exige une répartition des taches précise, permettant une gestion des ressources de l'équipage (CRM) optimale. A cette fin, des procédures normalisées (SOP) sont définies, fondées à la fois sur une stricte séparation des

[1] Désigne un système dans lequel toute défaillance, dysfonctionnement ou erreur de conception peut entraîner des pertes de vie ou un dommage environnemental majeur.

[2] Le projet de recherche AIRTIUS est cofinancé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et la Fondation de Recherche pour l'Aéronautique et l'Espace (FRAE), et labélisé par le Pôle de compétitivité Aerospace Valley.

[3] L'interaction tangible et les TEI (Tangible Embedded and Embodied Interaction) englobent les aspects matérialité ou changement de forme (interaction organique) de l'interface, l'incarnation physique des données, l'interaction avec le corps et l'interaction dans des espaces et des contextes physiques réels.

[4] Par une constante formation et répétition de tâches prescrites, les pilotes développent des capacités de coordination sensori-motrices entre prise d'informations sensorielles (données et contexte du vol) et capacité à maîtriser et gérer de manière sûre et économique des tâches motrices (actions) prévisibles et imprévisibles.

tâches et sur une collaboration étroite entre les deux rôles de Flying Pilot (PF) et de Pilot Monitoring (PM). L'objectif est de guider les pilotes et d'assurer un moyen sûr, logique, efficace et prévisible d'exécuter les missions et de répondre aux potentiels problèmes et dysfonctionnements [9].

Pour mener ces activités complexes, les pilotes interagissent avec les systèmes de l'avion au moyen d'interfaces spécialisées, regroupées en unités fonctionnelles et affichées sur différents écrans dédiés à chacune des activités principales de l'équipage. Ils opèrent ces systèmes et affichages numériques par l'intermédiaire de contrôleurs physiques : boutons, interrupteurs, tirettes, manettes, joysticks... [22]. Pendant le vol, les pilotes sont responsables de la surveillance, de l'extraction, de l'analyse et de l'évaluation des informations pertinentes. Ils effectuent une multitude d'opérations et coordonnent l'ensemble des activités au sein de l'équipage, mais aussi avec des entités extérieures travaillant sur le vol [17]. Ils développent des habiletés (skills) résultant de procédures, postures et gestes constamment répétés. Pour garantir leur gestion des tâches dans le cockpit (CTM) [11], les pilotes sont constamment impliqués dans des activités multiples et simultanées qui impliquent une distribution de leurs ressources cognitives. De nombreux facteurs externes interrompent constamment les pilotes et exacerbent la complexité d'exécution de ces multiples tâches, ce qui rend l'équipage des pilotes particulièrement vulnérable aux erreurs [17].

Cockpit tactile : un nouveau challenge pour l'aviation commerciale

Le concept de *Glass Cockpit* (1970-90) avait transformé radicalement les interfaces du cockpit des appareils commerciaux en remplaçant les très nombreux instruments analogiques (cadrans, jauges, horizon artificiel...) par un affichage numérique regroupant les données de chacun des systèmes avions. A partir des années 2000, le concept d'*Interactive cockpit* (A350, B787) intégrait ces systèmes au travers d'une interface graphique utilisateur (GUI) unique. Elle permet aux pilotes d'accéder aux données et fonctions sur tous les écrans avec un curseur unique, un curseur par pilote, géré par un dispositif de pointage de type trackball (KCCU), et de gérer dynamiquement l'espace d'affichage. Dans ces 2 concepts, ou d'autres comme SVS[5], les pilotes interagissent toujours au travers de dispositifs de commandes physiques.

Récemment, de nombreux constructeurs et fournisseurs aéronautiques[6] ont proposé des concepts innovants pour le cockpit basés sur l'utilisation d'écrans tactiles. Le défi pour l'industrie est de répondre à la complexité croissante des systèmes avec une plus grande flexibilité et de moindre coûts. Le concept de cockpit tactile permet aux industriels de proposer des lignes de produits performantes, adaptatives (au contexte de vol et aux nouveaux besoins du transport aérien) et génériques, pour adresser l'avionique civile ou militaire. Il présente également des bénéfices importants pour les pilotes, largement éduqués au tactile par l'usage de systèmes interactifs grands-publics, mais aussi pour les opérateurs avions, comme la maintenance corrective facilitée. Seules quelques offres sont aujourd'hui opérationnelles, comme la ligne de produit *Pro Line Fusion* de Rockwell Collins[7]. Des certifications avions par la *Federal Aviation Administration (*FAA) et l'*European Aviation Safety Agency* (EASA), issues de cette ligne de produits, ont été rendues possibles 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.

Des risques potentiels majeurs pour la sécurité aérienne

Bien que les exigences de sécurité et de performance requièrent des systèmes interactifs du cockpit qu'ils maximisent la perception, l'action et l'espace de collaboration des pilotes de

[5] Le concept SVS (Synthetic Vision System), conçu par la NASA, superpose à une vue 3D du contexte avion et vol, une vue géographique du terrain, les paramètres avion, des données de navigation, de situation, trafic, systèmes

[6] De nombreux avionneurs ou fournisseurs, tels que Thales, Rockwell Collins, Airbus, Garmin, Honeywell, Barco, Lockheed Martin, etc., ont déjà mis en œuvre la technologie tactile dans de nouveaux produits intégrés (recherche amont ou ligne de produits) pour les interfaces de poste de pilotage.

[7] La suite avionique tactile de Rockwell Collins est d'ores et déjà certifiée et opérationnelle, notamment pour la gamme Kingair 350 de Beechcraft ou Citation CJ3 de Cessna, elle équipera également le futur 777X de Boeing.

l'équipage, la littérature scientifique souligne plusieurs limitations de l'interaction tactile concernant ces aspects. Les écrans tactiles présentent de faibles retours sensori-moteurs et, comparées aux contrôleurs physiques existants du cockpit, plusieurs études ont montré les limites de l'interaction tactile en termes de performances [1,6,21]. Plus important, la nécessité d'utiliser le canal visuel pour ajuster l'action et contrôler la précision du mouvement [18] altère la distribution de l'attention, augmente la charge de travail et réduit la performance. Elle pose un problème de sécurité majeur en cas de visibilité réduite, par exemple fumée dans le cockpit, conditions lumineuses extrêmes, ou d'interruptions nécessitant le regard [8,10,18]. Un autre aspect critique pour la sécurité réside dans la détérioration des performances de l'interaction tactile en cas d'instabilité de l'avion (turbulences, vibrations) [7,14]. Le stress ou une charge cognitive élevée des pilotes peuvent présenter également une limite importante d'utilisabilité. Enfin, par rapport aux interfaces tangibles, l'interaction tactile réduit la conscience mutuelle et la collaboration au sein de l'équipage [8] et peut impacter la conscience de la situation (SA) [6].

2. Apports possibles des TEI pour les cockpits aéronautiques

Dans le cadre du projet AIRTIUS, un travail de recherche a débuté en 2016, visant à identifier et traiter les problèmes posés par la « tactilisation » des dispositifs interactifs du cockpit. L'hypothèse étant qu'une approche *mixte* des interfaces pilotes-systèmes, intégrant des objets et dispositifs physiques programmables et des interactions tangibles et incarnées (TEI) aux surfaces tactiles, permettrait d'augmenter l'utilisabilité et de sécuriser des interfaces basées sur l'usage du tactile.

Méthodologie

Le projet a été conduit avec une approche itérative et incrémentale, de l'identification de scénarios et formulation d'un concept de *cockpit tangible*, à l'évaluation de dispositifs interactifs tangibles sur des plateformes de test. L'analyse initiale a combiné plusieurs classes de méthodes : observations et interviews de pilotes, étude technique des dispositifs et interactions pilotes-systèmes existants, état de l'art scientifique et technique de l'interaction tactile et de technologies candidates, tangibles, haptiques, organiques[8], permettant d'augmenter le tactile.

L'étude s'est basée sur des séances d'observation, entretiens et ateliers participatifs, organisés avec des pilotes de ligne, incluant des données et résultats de projets antérieurs. En tout, plus de 30 pilotes ont participé à la compréhension de l'activité et des dimensions « tangibles » de l'espace d'interaction du cockpit [16]. Les observations, interviews contextuelles, ateliers ont été filmés et partiellement transcrits ; des citations pilotes ont été extraites et structurées en thèmes dans une base de données. Au cours des ateliers, les pilotes ont été invités à contribuer à la réflexion, à la production et à l'évaluation de prototypes, à participer à des expérimentations, visant à explorer de nouveaux concepts et dispositifs interactifs pour le cockpit.

Un espace de conception pour l'interaction tangible dans le cockpit

Un premier résultat du projet a été de formaliser un cadre méthodologique pour le design du cockpit tangible. Un travail initial a permis, à partir de l'étude ethnographique et des états de l'art des technologies et techniques d'interaction, de fournir un espace structuré de design pour les interactions pilotes-systèmes. L'espace de design proposé est lié à trois groupes d'exigences relatives : aux besoins de l'opérateur humain (RU), aux besoins de sécurité (RS), aux besoins industriels (RI). Il est structuré en trois dimensions : propriétés physiques liées à la forme, perception et action incarnées, programmabilité. Pour chacune des dimensions un ensemble de principes de design (ex. *favoriser les habiletés physiques*) est identifié, reliant les classes d'exigences (ex. *RU.1 perception directe*) aux propriétés observées pour la technologie ou modalité associée (ex : *perception et proprioception*). Ce travail a été publié à HCI-Aero 2016 [22].

D'autre part, le travail itératif d'exploration de l'activité, du concept et des espaces de solution, mené avec les pilotes, et plus spécifiquement une classification « thématique » des *verbatim* des pilotes, ont permis de mettre en évidence un ensemble de caractéristiques spécifiques à

[8] Interfaces organiques : désignent des interfaces physiquement adaptables au contexte ou modifiables par le système, la dynamicité de forme participant du système et des données. Un dispositif interactif organique peut dynamiquement évoluer selon le contexte, être déformé par l'action utilisateur ou changer sur requête système.

l'activité dans l'espace du cockpit. Parmi les principales caractéristiques observées ont été relevés : statut des sensations et du corps, externalisations et rôle majeur de la parole, incarnation des structures temporelles et rythmiques, usages incarnés de l'espace du cockpit. Ce travail a permis de construire, à l'aide de travaux théoriques (ex. phénoménologie), une interprétation visant à reformuler ce que l'interaction incarnée peut signifier pour les pilotes de ligne, et identifier ainsi des challenges, concepts clefs et implications pour le design de l'interaction tangible dans le cockpit. Ce travail de recherche a été publié à TEI 2018 [16].

Dispositifs interactifs tangibles pour les cockpits aéronautiques

Lors des séances d'idéation avec les pilotes, plus de 150 idées de design ont donné lieu à plus de 40 prototypes vidéo, explorant des thématiques et systèmes du cockpit : timelines, monitoring et gestion des systèmes, procédures et checklists … ; une sélection de ces idéations aboutissant à des prototypes fonctionnels, comme un « FCU[9] tactile » qui a été testé en vol dans des conditions de turbulences. Le phasage en itérations du projet a permis de passer de l'idée à l'objet, puis à l'objet connecté et finalement au composant interactif du cockpit tangible.

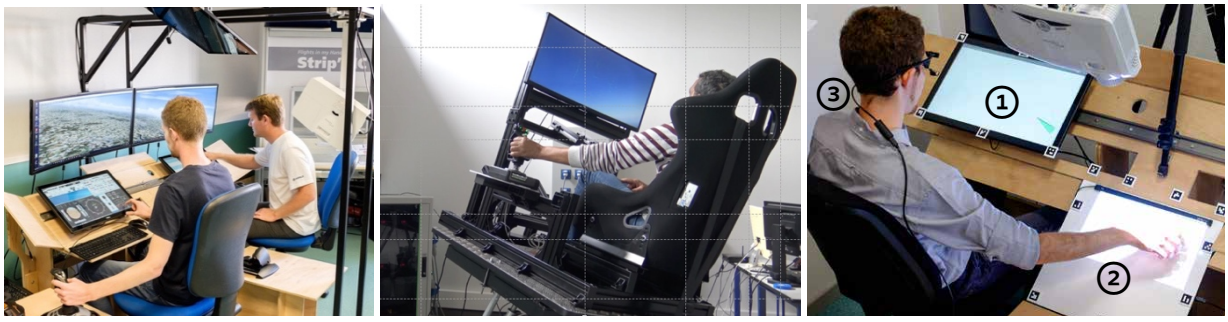


Figure 1: les plateformes de tests AIRTIUS, à gauche le simulateur « bois », au centre le simulateur « 6-axes », à droite, réalisation d'une expérimentation contrôlée avec le dispositif GazeForm

Pour l'intégration et l'évaluation des prototypes avec les pilotes, deux plateformes de tests ont été réalisées : un simulateur « bois » et un simulateur « 6-axes » (Figure 1), reproduisant de manière simplifiée le contexte d'un cockpit avion. La plateforme 6-axes permet de tester les dispositifs en contexte dégradé de vol (ex. turbulences). Les écrans, projecteurs, commandes et capteurs peuvent être facilement réarrangés. Les structures permettent d'intégrer rapidement de nouveaux prototypes et de les interfacer aux systèmes. Un logiciel de simulation de vol Lockheed Martin *Prepar3d*, permet de reproduire un environnement « écologique » pour les séances de conception et de tests avec les pilotes.

Trois concepts de dispositifs interactifs novateurs pour le cockpit, associant interaction tactile et interaction tangible et incarnée, ont été explorés, développés et évalués.

GazeForm : adaptation dynamique de l'interaction à la disponibilité du regard

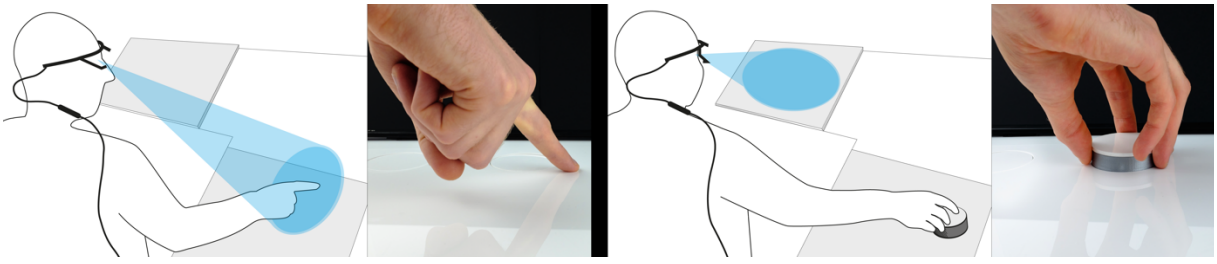


Figure 2 : Concept GazeForm, à gauche l'opérateur regarde l'interacteur et interagit avec une modalité tactile, à droite le regard étant porté sur une autre zone de l'interface, un interacteur physique émerge de la surface permettant une interaction tangible réalisable sans les yeux.

La limite majeure du tactile est qu'il nécessite le regard. L'interaction sans les yeux est presque impossible, ce qui rend difficile l'exécution simultanée d'autres tâches, mais aussi qui pénalise fortement l'interaction dans un contexte qui présente de nombreuses interruptions et reprises de

[9] Le FCU (Flight Control Unit) permet de modifier les paramètres avion pour contrôler tactiquement la trajectoire plan de vol de l'avion. Le défi était de tester les possibilités de l'interaction tactile en contexte d'instabilité du vol

tâches. Le concept *GazeForm* propose une surface tactile reconfigurable qui change de forme dynamiquement pour offrir une modalité d'interaction adaptée selon la direction du regard. Lorsque les yeux du pilote sont centrés sur l'interacteur, la surface interactive est plane et le système agit comme un écran tactile classique. Lorsque la direction du regard quitte la zone tactile, des boutons physiques émergent de la surface qui permettent une interaction tangible et libèrent le regard de l'opérateur pour l'exécution de tâches parallèles (Figure 2).

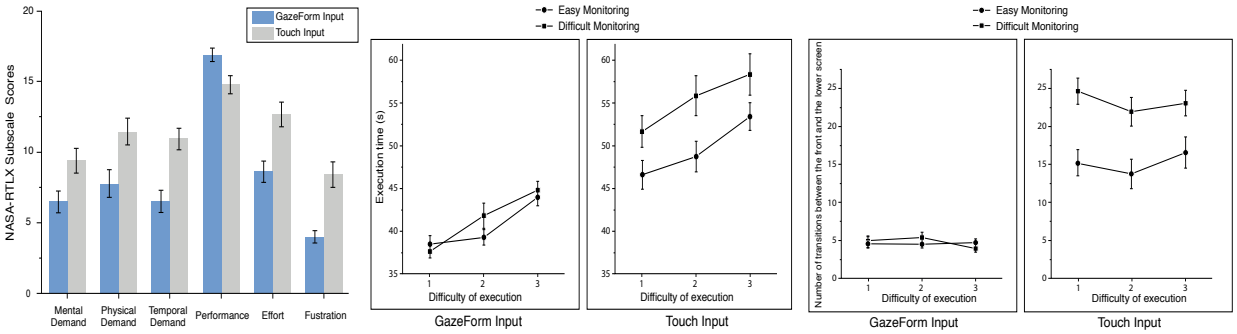


Figure 3 : 3 résultats expérimentaux comparant les contextes tactile seul et GazeForm, à gauche test NASA TLX comparant la charge subjective de l'opérateur, au centre comparaison des temps d'exécution, à droite comparaison du nombre de transitions entre écrans latéral (interacteur) et frontal.

Une expérimentation contrôlée a été conduite sur le simulateur « bois » (Figure 1, à droite). Afin de tester le concept et d'effectuer une comparaison réaliste entre modalité tactile et GazeForm. Nous avons réalisé un dispositif prototype basé sur une surface interactive à capacité tactile, intégrant des boutons rotatifs pouvant dynamiquement émerger ou se rétracter sur demande du système ou de l'opérateur. Un système d'eye-tracking (lunettes *Pupil-labs*) permet d'enregistrer le mouvement oculaire et de capter en temps réel la zone du cockpit ou le dispositif regardé, déclenchant dynamiquement le changement de modalité.

L'expérimentation, menée avec 24 participants, a comparé deux contextes d'interaction : un contexte uniquement tactile et un contexte *GazeForm* avec adaptation dynamique de la modalité entre tactile et tangible selon la direction du regard. Les tâches proposées incluaient des interruptions obligeant l'opérateur à surveiller et agir sur des informations apparaissant sur un écran situé face à lui (tel un PFD). Le concept, le dispositif, le protocole expérimental et les résultats sont détaillés dans un article publié à DIS 2018 [18]. Par rapport au seul mode tactile, les résultats expérimentaux ont montré que *GazeForm* générait une charge mentale subjective plus faible et une plus grande efficacité d'exécution (Figure 3 à gauche et au centre). Plus important, *GazeForm* exigeait moins d'attention visuelle, réduisait de façon importante le nombre de transitions visuelles entre écrans (Figure 3 à droite), diminuait le temps de réaction aux interruptions et facilitait la reprise de tâche après interruption.

Le concept *GazeForm* est très largement applicable pour des systèmes et interfaces basés sur l'interaction tactile, systèmes opérationnels critiques, notamment dans les transports, mais aussi dispositifs et applications grand public. Il a fait l'objet d'un dépôt de brevet [19].

Multiplié : exploration d'un concept de surface pliable interactive

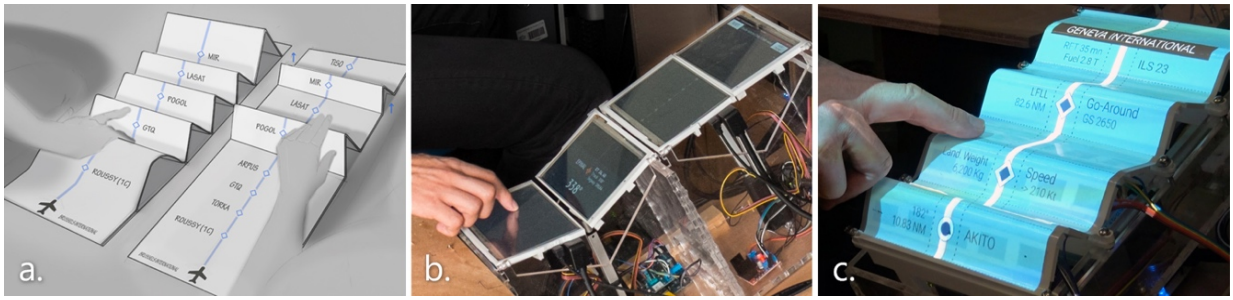


Figure 4 : Concept de surface interactive multiplis, a. dessin de principe et prototype papier, b. dispositif interactif formé de multiples écrans orientables et c. surface interactive continue pliable.

Cette hypothèse de conception d'une surface interactive « pliable », est apparue tôt dans le projet, issu de dessins, prototypes papier et vidéo (Figure 4 à gauche). Le concept, inspiré par

une structuration de l'activité basée sur des rythmes qui s'incarnent dans les parcours visuels et gestuels constamment répétés des pilotes, fonctionne comme un support d'activités fortement basés sur la manipulation de listes : procédures, checklists, plan de vol, etc. Il répond aussi aux contraintes de déploiement du tangible dans le cockpit identifiées au début du projet : danger d'utilisation d'objets non fixés, limites de l'haptique dans un environnement soumis à de fortes vibrations, etc. Ce concept a été explorée pendant plus d'un an, au cours d'une série d'ateliers réalisés avec des pilotes, chercheurs et designers, et a abouti à la réalisation de deux dispositifs tangibles pour le cockpit présentant des variantes du concept (Figure 4 au centre et à droite).

Le premier dispositif interactif d'**écrans multiples « articulables »** (Figure 4.b) est composé de 4 mini écrans (7 pouce, HD) tactiles, qui peuvent être orientés pour former des plis positifs ou négatifs. L'orientation des écrans, gérée par des vérins verticaux, peut être pilotée par le système ou déclenchée par un geste de l'opérateur sur les écrans. L'inclinaison des écrans permet de réaliser une suite de plans inclinés, les deux écrans centraux pouvant être alignés pour former une surface double. Cette première itération du concept a permis d'explorer l'apport du « pli » en termes de composition tangible de l'information, de notification « augmentée » et de guidage ergonomique à l'action des pilotes.

Le deuxième dispositif interactif de **surface d'affichage interactive « plissable »** (Figure 4.c) est constitué d'une surface souple continue à changement de forme. La surface, imprimée en 3D par fabrication additive, présente des variations d'épaisseurs qui permettent sa déformation en plis parallèles réguliers. Des vérins horizontaux agissent sur des points de fixation au support pour former des « plis » sur la surface continue. La fabrication additive a également permis d'intégrer à la surface des zones en matériau conducteur, reliées à des capteurs de toucher et permettant de tactiliser les plis : tactilisation du sommet des plis et création de 5 zones tactiles par face. L'opérateur peut ainsi réaliser des interactions tactiles pour former ou aplatir le pli ou pour interagir avec les données. L'affichage est réalisé par vidéo projection sur la surface. Elle est par logiciel automatiquement adaptée à la déformation de la surface.

Deux itérations de 4 séances d'évaluation chacune, organisées avec des pilotes, ont permis de tester les deux prototypes sur la base de scénarios d'activité (checklists, plan de vol, gestion des systèmes, dialogues sol-bord Data Link…). L'exploration du concept, les dispositifs et les résultats des évaluations sont détaillés dans un article accepté à la conférence CHI 2019 [20].

Ces séances ont permis de valider le concept d'une surface interactive flexible « multiplis » pour le cockpit. Ce concept, associant tactile et tangible, permet d'interagir physiquement avec des séquences ordonnées de données (procédures, plan de vol), ou des données de multiples systèmes ; de notifier des informations critiques ou des actions requises du pilote ; de faciliter et guider l'interaction en utilisant la forme physique. Les résultats de l'exploration menée avec les pilotes ont montré l'adéquation aux activités de l'équipage en termes de sécurité, d'efficacité et de collaboration. Notamment une perception visuelle des informations système, par le biais des formes physiques (levé du pli ou « battement » rapide de la surface), extrêmement efficace pour des tâches collaboratives et l'efficacité des interactions physiques pour renforcer la perception de l'action et pour assurer la sécurité par l'anticipation et la conscience mutuelle. Pour la surface souple notamment, les pilotes ont relevé la puissance d'expression d'un concept de *flat cockpit* (référant au concept de *dark cockpit*) : où l'état entièrement plat de la surface s'oppose à la levée d'un pli physique appelant impérativement l'action du pilote. Cette surface souple structurée répond également à un besoin de contrôle : les pilotes l'ont majoritairement perçue comme une réelle aide dans le pilotage des systèmes, notamment pour gérer plus facilement les interruptions en fournissant un support tangible pour marquer des étapes, se repérer ou reprendre une tâche.

3. Des questions ouvertes pour le design des futurs cockpits

Le travail de recherche présenté constitue une première exploration d'un concept de « cockpit tangible », visant à identifier et traiter les problèmes potentiels posés par la tactilisation des interfaces pilotes-systèmes. Les industriels du secteur aéronautique sont bien évidemment conscients de ces problèmes et forment des solutions adaptées. Notre objectif est de contribuer par une approche originale à la conception des futurs systèmes interactifs, et d'augmenter

notamment le niveau de maturité technologique des interactions tangibles dans le cockpit. Notre propos ici et pour le débat des *Entretiens de Toulouse* est d'ouvrir sur un espace de discussions avec les industriels et spécialistes en confrontant les résultats de travaux académiques issus de l'interaction tangible et incarnée (TEI) avec les nouveaux besoins industriels. A partir des expériences acquises dans le cadre du projet AIRTIUS, nous souhaitons engager une réflexion « polémique » à la fois sur la compréhension des dimensions tangibles de l'espace d'interaction du cockpit, sur les méthodes de conception et de prototypage avec les pilotes des futures interfaces, sur les technologies et techniques potentielles de l'interaction tangible, haptique ou organique, et sur leurs possibles apports à l'« augmentation » des surfaces tactiles.

Remerciements

Nous remercions tout particulièrement les pilotes, ainsi que l'ensemble des chercheurs et designers du consortium AIRTIUS : ENAC, ISAE, Ingenuity, Intactile Design, Astrolab, qui ont contribué à ces travaux de recherche. Le projet de recherche AIRTIUS est cofinancé par l'Agence nationale de la recherche (ANR) et par la Fondation française de recherche aéronautique et spatiale (FRAE). Il est soutenu par le Pôle de Compétitivité Aerospace Valley.

Références

1. Alapetite, A., Fogh, R., Zammit-Mangion, D. et al., 2012. Direct Tactile Manipulation of the Flight Plan in a Modern Aircraft Cockpit. *In* Proc. of HCI-Aero '12.
2. Avsar, H., Fischer, J.E., Rodden, T., 2016. 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.
3. Bachynskyi, M., Palmas, G., Oulasvirta, A., Steimle, J., and Weinkauf, T., 2015. Performance and Ergonomics of Touch Surfaces: A Comparative Study using Biomechanical Simulation. ACM Press, 1817–1826.
4. Barbé, J., Chatrenet, N., Mollard, R., Wolff, M. and 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, , Pages 9 , 8 pages.
5. Barstow, D., 2012. The aviation iPad revolution. J. AIR TRAFFIC CONTROL 54.
6. Casner, S.M., Geven, R.W., Recker, M. P. and Schooler, J.W., 2014. The Retention of Manual Flying Skills in the Automated Cockpit. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society.
7. Cockburn, A., Gutwin, C., Palanque, P., Deleris, Y., Trask, C., Coveney, A., Yung, M. and MacLean, K., 2017. Turbulent Touch: Touchscreen Input for Cockpit Flight Displays. In *Procs of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (CHI '17). ACM, New York, NY, USA, 6742-6753.
8. Cohen, P. R. and McGee, D. R., 2004. Tangible multimodal interfaces for safety-critical applications. *Commun. ACM* 47, 1 (January 2004), 41-46.
9. Degani A, Wiener E.L. Cockpit checklists: Concepts, design, and use. Human Factors. 1993. 35((2)):28–43.
10. Dodd, S., Lancaster, J., Miranda, A. et al. 2014. Touch Screens on the Flight Deck: The Impact of Touch Target Size, Spacing, Touch Technology and Turbulence on Pilot Performance. *In Pp. 6–10. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA*.
11. Funk, K., 1991. Cockpit task management: Preliminary definitions, normative theory, error taxonomy, and design recommendations. *The International Journal of Aviation Psychology, 1(4), 271-285.*
12. 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.
13. Harrison, C. and 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* (CHI '09). ACM, New York, NY, USA, 299-308.
14. Hourlier, S., Guérard, S., Barou, J.-L., and Servantie, X., 2015. *Testing Touch Screens in Realistic Aeronautic Turbulent Conditions (Light to Severe)*. SAE International Journal of Aerospace 8.
15. Hourlier, S., 2015. Human Factors Drivers Behind Next Generation AV2020 Cockpit Display (SAE Technical Paper No. 2015- 01–2537). SAE International, Warrendale, PA.
16. Letondal, C., Vinot, J.-L., Pauchet, S., Boussiron, C., Rey, S., Becquet, V. and Lavenir, C., 2018. Being in the Sky: Framing Tangible and Embodied Interaction for Future Airliner Cockpits. In *Proc. 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

17. Loukia D. Loukopoulos, R. K. Dismukes, and I. Barshi. 2001. Cockpit interruptions and distractions: A line observation study. *Proceedings of the 11th international symposium on aviation psychology*, Ohio State University Press Columbus, 1–6.
18. Pauchet, P., Letondal, C., Vinot, J.-L., Causse, M., Cousy, M., Becquet, V. and Crouzet, G. 2018. GazeForm: Dynamic Gaze-adaptive Touch Surface for Eyes-free Interaction in Airliner Cockpits. In *Proc. of the 2018 Designing Interactive Systems Conference* (DIS '18). ACM, New York, NY, USA, 1193-1205.
19. Pauchet, P., Letondal, C., Vinot, J.-L., 2018. System and method for modulation of control interface feedback. France, Patent n° : EP17306543. 2018. 〈hal-01725865〉
20. Pauchet, P., Vinot, J.-L., Letondal, C., Lemort, A., Lavenir, C., Lecomte, T., Rey, S., Becquet V. and Crouzet, G., 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, Glagsow, Scotland, UK.* ACM, New York, NY, USA. https://doi.org/10.1145/3290605.3300384
21. Tory, M. and Kincaid R.. 2013. Comparing physical, overlay, and touch screen parameter controls. ACM Press, 91–100.
22. Vinot, J.-L., Letondal, C., Pauchet, S. and Chatty, S.. 2016. Could tangibility improve the safety of touch-based interaction?: exploring a new physical design space for pilot-system interfaces. In *Proc. 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
23. Voelker, S., Øvergård, K.I., Wacharamanotham, C. and Borchers J.. 2015. Knobology Revisited: A Comparison of User Performance between Tangible and Virtual Rotary Knobs. In *Proc. of the 2015 International Conference on Interactive Tabletops & Surfaces* (ITS '15). ACM, New York, NY, USA, 35-38.