



HAL
open science

Application mobile d'aide à la navigation aérienne : une perspective de conception participative

Florine Simon, Jean-Paul Imbert, Pierre Cailleton, Laurent Hublet, Anke Brock

► To cite this version:

Florine Simon, Jean-Paul Imbert, Pierre Cailleton, Laurent Hublet, Anke Brock. Application mobile d'aide à la navigation aérienne : une perspective de conception participative. 33rd Conference on Interaction Humain-Machine (IHM '22), Apr 2022, Namur, Belgique. 10.1145/3500866.3516373 . hal-03551135

HAL Id: hal-03551135

<https://enac.hal.science/hal-03551135>

Submitted on 1 Feb 2022

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.

Application mobile d'aide à la navigation aérienne : une perspective de conception participative

Mobile navigation aid for pilots: a participatory design approach

Florine Simon
florine.simon@enac.fr
ENAC, Université Toulouse
Toulouse, France

Jean-Paul Imbert
jean-paul.imbert@enac.fr
ENAC, Université Toulouse
Toulouse, France

Pierre Cailleton*
pierre.cailleton@alumni.enac.fr
ENAC, Université Toulouse
Toulouse, France

Laurent Hublet*
laurent.hublet@alumni.enac.fr
ENAC, Université Toulouse
Toulouse, France

Anke M. Brock
anke.brock@enac.fr
ENAC, Université Toulouse
Toulouse, France

ABSTRACT

Piloting an aircraft takes place in a complex, changing and dynamic environment. It requires a rapid decision-making process as well as the mobilization of high-level cognitive capacities. For example, pilots have to select, process, and memorize a large flow of information. In this paper, we present the participatory design process we conducted to design a mobile navigation aid for pilots of light aircraft. This application allows pilots to prepare the flight, obtain information while flying and set alarms. We describe the iterative design process over two iterations of the prototype, including brainstorming sessions, co-design sessions, tests in flight simulators and a final test in an aircraft. We conclude with design recommendations which can be used for the design of future mobile navigation aid applications for aircraft.

CCS CONCEPTS

• **Human-centered computing** → **HCI design and evaluation methods**; *Touch screens*; *Gestural input*; *Laboratory experiments*.

KEYWORDS

Cockpit, Tablet, Participatory Design

RÉSUMÉ

Le pilotage d'un avion s'inscrit dans un environnement complexe, changeant et dynamique, nécessitant un processus de prise de décisions rapide ainsi qu'une mobilisation des capacités cognitives de haut niveau. Les pilotes doivent par exemple sélectionner, traiter, et mémoriser un flot important d'informations. Dans cet article, nous présentons le processus de conception participative que nous

*Les deux auteurs ont contribué à parts égales à ces travaux.

Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for components of this work owned by others than the author(s) must be honored. Abstracting with credit is permitted. To copy otherwise, or republish, to post on servers or to redistribute to lists, requires prior specific permission and/or a fee. Request permissions from permissions@acm.org.

IHM '22, April 5–8, 2022, Namur, Belgium

© 2022 Copyright held by the owner/author(s). Publication rights licensed to ACM.

ACM ISBN 978-1-4503-9189-4/22/04...\$15.00

<https://doi.org/10.1145/3500866.3516373>

avons mis en place pour concevoir une application mobile d'aide à la navigation pour les pilotes d'aviation générale. Cette application permet aux pilotes de préparer le vol en amont, obtenir des informations durant le vol et programmer des alarmes. Notre processus de conception comporte deux itérations de notre prototype, comprenant des séances de brainstorming, des séances de co-conception, des tests sur simulateurs de vol et un test final en conditions réelles dans un avion. Nous concluons par des recommandations de design qui peuvent être utilisées pour la conception de futures applications mobiles d'aide à la navigation aérienne.

MOTS-CLÉS

Cockpit, Tablette, Conception Participative

ACM Reference Format:

Florine Simon, Jean-Paul Imbert, Pierre Cailleton, Laurent Hublet, and Anke M. Brock. 2022. Application mobile d'aide à la navigation aérienne : une perspective de conception participative. In *IHM '22: Proceedings of the 33rd Conference on l'Interaction Humain-Machine (IHM '22)*, April 5–8, 2022, Namur, Belgium. ACM, New York, NY, USA, 13 pages. <https://doi.org/10.1145/3500866.3516373>

1 INTRODUCTION

Le pilotage d'un avion mobilise des capacités cognitives de haut niveau. En effet, les tâches de pilotages s'inscrivent dans un environnement complexe et changeant, qui implique un processus de prise de décisions rapide. De plus, un effort attentionnel important est nécessaire pour intégrer en permanence les diverses informations affichées sur les instruments du cockpit ou provenant du monde extérieur [17].

La règle d'or du pilote, que ce soit en aviation générale (c'est-à-dire l'aviation civile qui n'est pas destinée au transport commercial de passagers) ou commerciale, est l'ANC : Aviate (Fly), Navigate, Communicate (voler, naviguer, communiquer) [25]. Dans le domaine de l'aviation commerciale, les équipages utilisent la gestion des ressources de l'équipage (CRM - Crew Resource Management) et les procédures associées pour répartir la charge de travail et les tâches liées à la gestion du vol; assurant ainsi un haut niveau de sécurité. Dans l'aviation générale, le pilote peut opérer son avion seul et sans automatismes rendant la problématique de l'application de cette règle d'or plus importante encore et la gestion de la charge

de travail et la distribution de l'attention critique [26]. En effet, on observe un nombre relativement élevé d'accidents d'aviation générale par rapport à l'aviation commerciale, qui est aussi renforcé par le fait que les pilotes ont souvent moins de formations et d'expérience.

Lors d'un vol à vue (VFR, Visual Flight Rule) le pilote doit pouvoir se repérer dans l'espace grâce à des repères visuels au sol, par exemple des villes, des rivières, ou encore des lignes de chemin de fer. La préparation du vol est une étape cruciale, elle doit permettre au pilote de prendre en compte tous les éléments nécessaires à la bonne conduite du vol : la météo, la route, les zones traversées, l'activation des zones prohibées, le bilan de carburant de masse et de centrage (nous identifions ici un *besoin "préparation"*). Une bonne préparation a un impact direct sur le déroulement du vol et la charge de travail du pilote. Lors de la phase de vol, le pilote doit assurer le 'voir et éviter' c'est-à-dire sa séparation avec les autres aéronefs, le suivi de sa route avec des repères visuels et l'assistance de moyen de navigation (*besoin "navigation"*), la gestion du carburant (il peut être amené à changer de réservoir de façon périodique, *besoin "gestion carburant"*) et les interactions avec le contrôle qui peut lui demander de reporter sa position ou de rappeler sur des points identifiés (*besoin "interaction contrôle"*). Le pilote devra en outre accéder à des services d'informations par radio ou téléphone (comme le Service d'Information de Vol ou le service Automatic Terminal Information Service, *besoin "information"*). Il peut cependant arriver que le pilote doive faire face à des situations imprévues comme le déroutement vers un autre aéroport ce qui demande de changer le plan de vol (*besoin "changer plan de vol"*). Dans cette situation il lui sera nécessaire d'accéder à des cartes VAC ("Visual Approach Chart" ou carte d'approche visuelle en français) lui permettant de prendre connaissance du terrain (*besoin "accès VAC"*).

Les instruments et les procédures de vol des avions de l'aviation générale ont subi une transformation importante au cours de la dernière décennie avec la généralisation du GPS à bord et le changement de l'avionique qui est passée de six instruments électromécaniques à des écrans intégrés. Cette évolution s'est également accompagnée de l'arrivée d'assistants sur tablette pour la documentation, la préparation et le déroulement du vol : les EFB (Electronic Flight Bag). Les analyses d'accidents du NTSB (National Transportation Safety Board) montrent que les pilotes qui sont distraits par des tâches moins essentielles peuvent perdre le contrôle de leur appareil [5]. En aviation générale les EFB vont bien au-delà de la documentation électronique puisqu'il s'agit également d'applications de navigation utilisant le GPS de la tablette. Ces applications peuvent être gratuites et limitées à la France comme SDVFR [32] et Mach7 [27] ou mondiales et sur abonnement comme Skydemon [35] et Foreflight [16]. Certaines d'entre elles préviennent le pilote lorsque la trajectoire de l'aéronef l'amène trop près du relief ou d'une zone prohibée.

Dans ce papier nous présentons le travail que nous avons mené pour concevoir une application pour tablette pour accompagner les pilotes avant et durant le vol. Nous avons appliqué des méthodes de conception participative avec des pilotes issus de l'aviation générale pour concevoir cette application dans une démarche itérative. Nous avons validé l'application en simulateur de vol et dans un vrai

avion. Pour finir, nous proposons des recommandations de design qui peuvent guider les développeurs de telles applications mobiles.

2 ETAT DE L'ART

2.1 Applications mobiles d'aide à la navigation aérienne

Différentes applications mobiles d'aide à la navigation aérienne sont déjà utilisées par les pilotes de l'aviation générale. Les applications mentionnées ici offrent des interactions simples, essentiellement basées sur le principe du single tap (les utilisateurs naviguent en touchant les éléments). Les applications qui intègrent une carte (AirMate [1], SDVFR [32], SkyDemon [35], etc.) permettent d'interagir avec la carte au moyen de gestes tels que le pinch et le pan (les utilisateurs peuvent faire glisser les surfaces verticalement, horizontalement ou de manière omnidirectionnelle pour se déplacer de manière continue dans la carte). Ces gestes sont couramment utilisés pour l'interaction avec les dispositifs tactiles [37]. Certaines applications couvrent uniquement des aspects très précis du vol, comme la gestion du temps ou le déroulement des checklists et d'autres offrent une gestion plus globale du vol.

2.1.1 Gestion des tâches. Lors d'un vol, les pilotes sont amenés à dérouler plusieurs checklists. Les checklists sont des séquences d'actions ordonnées à réaliser par l'équipage à des moments précis du vol. Elles permettent d'assurer que toutes les actions requises sont effectuées sans omission et de manière ordonnée. Elles peuvent être de différents types, on trouve par exemple des checklists d'urgence, de panne, ou plus simplement des checklists à effectuer à chaque phase de vol. Active Checklist [9] se concentre sur la gestion des checklists organisées en 4 niveaux (type d'avion -> type de checklist -> checklist -> tâches), et permet par exemple de les personnaliser et d'en créer de nouvelles. L'application déduit la phase de vol en cours (décollage, croisière, atterrissage, etc.) en fonction des données du GPS et propose au pilote la checklist adaptée. Pilot Checklists for General Aviation Aircraft [15] permet au pilote d'écouter les checklists grâce à un système de synthèse vocale. Il peut également confirmer oralement (comme il le ferait avec un copilote) la réalisation des tâches.

2.1.2 Gestion globale du vol. Quelques applications offrent la possibilité de gérer le vol dans la globalité. Elles permettent de planifier le vol en amont, d'obtenir des informations pendant le vol, et d'enregistrer les données de vol pour les analyser après coup. C'est par exemple le cas de AirMate [1], SDVFR [32], SkyDemon [35], Foreflight [16] et Mach7 [27].

2.1.3 Limitations. Si les applications existantes couvrent une grande partie des besoins du pilote, il n'y en a aucune à notre connaissance qui couvrent les interactions avec le contrôle aérien (*besoin "interaction contrôle"* comme identifié dans la section 1) ou la gestion du carburant (*besoin "gestion carburant"*); ces aspects sont gérés par le pilote qui doit alors les mémoriser ou les noter. Les interruptions, l'évolution de la situation météo ou encore la complexité de la situation peuvent amener le pilote à oublier ou ne pas faire en temps et en heure certaines de ces actions. Il nous semble également important de concevoir ce type d'applications

d'une manière centrée utilisateur afin qu'ils correspondent aux besoins des pilotes. Nos travaux se concentrent sur cet aspect.

2.2 Utilisation de dispositifs tactiles dans le cockpit

Les écrans tactiles, grâce à la modularité qu'ils permettent, sont de plus en plus utilisés dans l'aviation. On les retrouve notamment sur les EFBs des avions commerciaux mais également au sein du cockpit. L'écran tactile, intégré au cockpit, développé par Thales pour l'Airbus A350 a par ailleurs obtenu la certification de l'Agence de sécurité aérienne de l'Union Européenne (European Union Aviation Safety Agency, EASA) pour une utilisation à bord d'avions commerciaux en novembre 2019.

2.2.1 Interactions pendant des situations critiques et turbulences. L'utilisation des technologies tactiles au sein du cockpit font l'objet de nombreuses études dans la littérature.

Dodd et al. [13] ont mené une étude sur un simulateur pour identifier l'impact de la taille de la cible tactile, des espacements entre les cibles ainsi que les turbulences sur la performance de saisie d'informations sur un écran tactile. Ils ont également étudié leur impact sur la charge mentale et la fatigue perçue par les participants. Les résultats de cette étude indiquent que la taille des cibles tactiles a un impact plus important sur la perception de la charge de travail par les pilotes que l'espacement entre les cibles.

D'autres travaux mettent en avant les difficultés d'utilisation des dispositifs tactiles au sein des cockpits, en particulier lors de la saisie d'informations dans un environnement turbulent [12, 36, 38, 39].

Pour pallier à ces problèmes, Cockburn et al. [10] ont mené une étude comparative des performances des utilisateurs avec trois méthodes de saisie de texte sur écran tactile : la saisie au doigt, le trackball (actuellement utilisé dans les avions commerciaux) et un écran tactile recouvert d'un pochoir qui permet de stabiliser les doigts lors de l'interaction. Ils ont testé ces solutions en environnement turbulent et ont montré que l'utilisation du pochoir permettait de réduire les erreurs sur les petites cibles lors de vibrations élevées. Dans une autre étude, Cockburn et al. [11] ont démontré l'utilisabilité du système Brace Touch dans un environnement turbulent. Brace Touch permet aux utilisateurs de stabiliser l'espace d'interaction en plaçant simultanément plusieurs doigts sur l'écran. L'utilisateur interagit au moyen d'un geste, tout en gardant plusieurs doigts au contact de la surface pour stabiliser l'interaction.

2.2.2 Interaction tactile et dispositifs tangibles. D'autres travaux explorent l'utilisation des interfaces tangibles au sein du cockpit pour remédier aux limites des interfaces tactiles [8, 18, 24, 38].

En effet, l'absence d'interacteurs physiques sur les dispositifs tactiles, forçant l'utilisateur à porter son regard sur le dispositif lors de l'interaction, soulève également des problèmes en particulier dans des environnements complexes comme le cockpit, où l'attention visuelle est très limitée. Pauchet et al. [29] ont développé une interface tactile adaptative qui change de forme en fonction de l'emplacement du regard du pilote. Quand le pilote regarde la surface interactive, celle-ci reste plane et se comporte comme un écran tactile. En revanche, des boutons émergent de la surface lorsque le

regard du pilote quitte la surface interactive, lui permettant ainsi d'interagir avec cette dernière sans avoir à la regarder.

2.2.3 Interaction par geste tactile. L'interaction tactile directe (point-and-touch) nécessite l'attention visuelle de l'utilisateur. L'interaction par gestes tactiles offre la possibilité d'être réalisée sans regarder le dispositif interactif ou avec une attention visuelle réduite. Certains gestes tactiles ne nécessitent pas non plus nécessairement d'être effectués à un emplacement précis de l'interface.

Les travaux menés par Bragdon et al. [6] montrent que lorsque l'utilisateur est concentré sur le dispositif interactif, les gestes tactiles offrent des performances et une précision comparables à un clic sur un bouton. Ils améliorent en revanche les performances et réduisent la charge attentionnelle lorsque l'environnement ne permet pas à l'utilisateur de porter son attention sur le dispositif ("non-ideal environment"), comme par exemple lors d'une tâche de pilotage. Ecker et al. [14] ont mené une étude auprès d'utilisateurs lors d'une tâche de conduite et ont démontré l'utilisabilité de gestes tactiles dans un environnement de conduite. Bien que les travaux mentionnés plus haut (2.2.1) montrent des limitations concernant les interactions tactiles en situation de turbulence, l'interaction gestuelle dans le cockpit offre une perspective pertinente dans ce contexte.

3 MÉTHODE ET MATÉRIEL

La conception participative [19] est une méthode qui repose sur la participation active des utilisateurs tout au long du processus de conception, à la fois pour garantir une bonne compréhension de leurs pratiques de travail mais également pour concevoir des outils interactifs qui répondent à leurs besoins réels. Cette approche permet non seulement la génération constante de nouvelles idées, mais aussi l'évaluation de solutions dans toutes les phases du processus de conception.

Nous présentons ici le résultat de la mise en oeuvre d'une démarche de conception participative dans le cadre de la conception d'une application d'aide à la navigation aérienne : notre prototype FlyMate. Nous détaillerons par la suite (en section 4) comment ces idées ont émergées au travers du processus de conception participative.

3.1 FlyMate : application mobile d'aide à la navigation pour pilotes

Nous avons développé FlyMate, un prototype d'assistant à la navigation pour les vols VFR ("Visual Flight Rules" ou vol à vue, par opposition aux vols aux instruments), dont nous détaillerons ici les principales fonctionnalités et ferons le lien avec les besoins identifiés en section 1. Cet assistant prend la forme d'une application mobile, que le pilote peut manipuler en vol. Il permet au pilote de planifier son vol en amont (*besoin "préparation"* comme identifié dans la section 1) et d'avoir des informations sur sa navigation pendant le vol (*besoin "navigation"*). Le prototype est une application Android, présenté aux utilisateurs sur des tablettes Huawei Mediapad M5.

3.2 Implémentation

L'application récupère des informations provenant de la base de données du SIA (Service de l'Information Aéronautique)¹. Le fond de carte (statique) est fourni par SkyDreamSoft². L'application et le simulateur de vol communiquent via des trames UDP. Le simulateur fournit à l'application les données relatives à l'avion (sa position, sa vitesse, son cap, etc.). Si l'application n'est pas connectée au simulateur (en vol réel par exemple), elle utilise les données du GPS de la tablette.

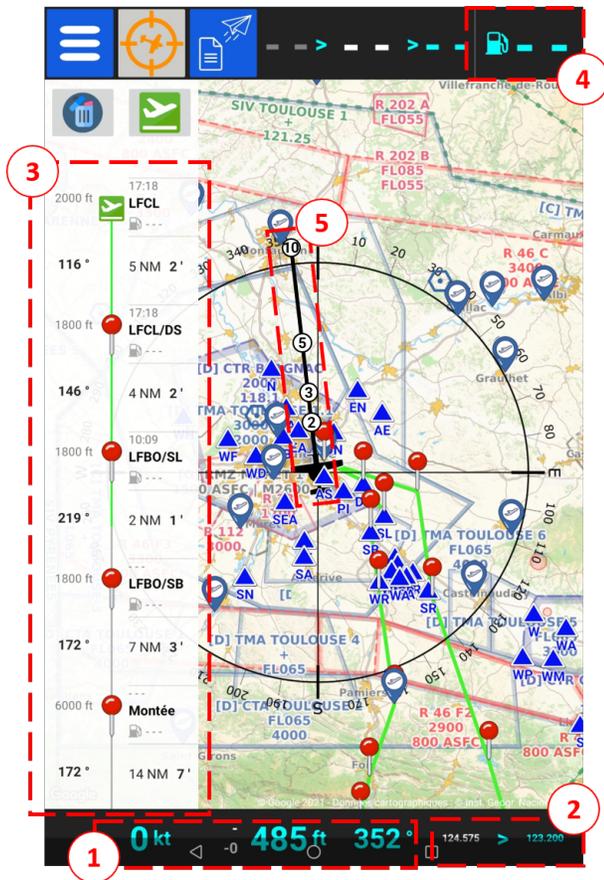


FIGURE 1: Capture d'écran de l'application FlyMate (Version 3 du prototype, cf fig. 2). 1) Panneau d'informations de vol, 2) Fréquence radio, 3) ligne de temps avec plan de vol, 4) estimation du carburant, 5) vecteur de vitesse.

3.3 Panneau d'information de vol

FlyMate (fig. 1) propose l'affichage d'un panneau d'informations de vol (point 1 sur la figure). Le panneau d'information de vol permet au pilote de connaître en temps réel les paramètres les plus importants de l'avion tels que sa vitesse au sol, son altitude, son cap, sa latitude et longitude (*besoin "navigation"*).

¹<https://www.sia.aviation-civile.gouv.fr/>

²<https://sdoaci.skydreamsoft.fr/>

3.4 Fréquence radio du service d'information de vol de la zone survolée

On trouve sur l'interface (point 2) du prototype des informations relatives à la fréquence radio du service d'information de vol disponible pour la zone survolée (*besoin "information"*). Le Service d'Information de Vol (SIV) est un service assuré par un organisme de la circulation aérienne dont le but est de fournir aux aéronefs les informations utiles à l'exécution sûre et efficace des vols. Les pilotes peuvent contacter eux-mêmes le service pour avoir des informations sur l'état d'un terrain, la météo ou la piste en service. Certaines informations en revanche sont communiquées spontanément par le service (par exemple la fermeture d'un terrain de destination du vol).

3.5 Représentation temporelle du plan de vol

Sur la partie gauche de l'interface (point 3), on trouve une ligne de temps qui représente le plan de vol. Elle indique au pilote les différentes étapes du vol, les heures d'arrivée prévues à chaque point, le carburant nécessaire, etc. (*besoins "navigation" et "gestion carburant"*).

3.6 Estimation du carburant

Sur la partie haute de l'interface (point 4), le système fournit une estimation du niveau de carburant actuel ainsi que le carburant disponible aux prochaines étapes du vol, permettant au pilote de savoir à quel moment changer de réservoir (*besoin "gestion carburant"*).

3.7 Vecteur de vitesse

Le vecteur vitesse (point 5) fournit une indication visuelle de l'endroit où l'avion se trouvera dans 2, 3, 5 et 10 minutes si le pilote maintient son cap et sa vitesse (*besoin "navigation"*). Le prototype communique en UDP avec le simulateur pour recevoir des données telles que la vitesse et le cap. Cette fonctionnalité est également présente dans d'autres systèmes. Elle permet aux pilotes de comprendre la future trajectoire de l'avion.

3.8 Programmation de rappels au passage d'un point d'intérêt

FlyMate permet au pilote de programmer deux types de rappel différents : un rappel "carburant" (ce rappel est utile pour signifier au pilote à quel moment il doit changer de réservoir, *besoin "gestion carburant"*) et un rappel "contrôle aérien" (qui signifie au pilote qu'il doit contacter le contrôle aérien au survol d'un point d'intérêt, *besoin "interaction contrôle"*). Le pilote peut programmer un rappel au moyen d'un geste. La programmation d'un rappel se fait par l'entourage d'un point d'intérêt par le pilote (une balise ou un aéroport par exemple) : un rappel est programmé et se déclenche à l'approche du point d'intérêt. Cette fonctionnalité n'est pas disponible dans les autres systèmes existants (section 2.1) et présente donc une nouveauté.

3.9 Déroutement vers un terrain non prévu ("GO-TO")

Un déroutement consiste à atterrir volontairement sur un autre aéroport que celui prévu initialement. Diverses raisons peuvent

TABLE 1: Etapes de la conception auxquels les pilotes ont participé : E = Entretien, B = Brainstorming, W = Design Walkthrough, T = Test, C = Co-conception.

Participant	Etape de la conception
P1	E, B, T
P2	E
P3	E, B, W, T
P4	E, B
P5	E
P6	B, W
P7	B, W, T
P8	B, W, T
P9	B, W
P10	B
P11, P12, P13, P14, P15, P16	C

amener les pilotes à se dérouter : des mauvaises conditions météorologiques à l'aérodrome initialement prévu, une panne d'un système qui impose aux pilotes d'atterrir le plus rapidement possible, une piste d'atterrissage fermée, etc. FlyMate permet aux pilotes de changer l'aérodrome de destination en mettant à jour le plan de vol (*besoin "changer plan de vol"*).

3.10 Affichage des cartes VAC

Les cartes VAC contiennent les informations relatives aux terrains sur lesquels il est possible d'atterrir. FlyMate permet aux pilotes de consulter les cartes VAC des aérodromes au format PDF (*besoins "navigation" et "accès VAC"*).

3.11 Préparation de vol

FlyMate peut être utilisée durant le vol. L'application a cependant aussi pour objectif de permettre la préparation en amont du vol (*besoin "préparation"*).

4 CONCEPTION PARTICIPATIVE D'UN ASSISTANT MOBILE POUR PILOTES

Notre objectif étant de concevoir un système qui réponde aux besoins des pilotes de l'aviation générale, nous avons appliqué une démarche de conception participative dans le cadre de cette étude. La figure 2 représente une vue chronologique de nos étapes de conception. Nous considérerons ici une itération terminée quand une version a pu être testée (sur simulateur ou en vol). Au total, seize pilotes ont participé à notre processus de conception participative. Le tableau 1 synthétise les caractéristiques des participants ainsi que les étapes de conception auxquelles ils ont pris part. En raison des restrictions imposées pendant la crise sanitaire, nous avons dû adapter le processus pour nous conformer aux consignes locales. Les brainstormings et une séance de design walkthrough ont ainsi été effectués de manière virtuelle.

4.1 Entretiens

Nous avons dans un premier temps mené des entretiens semi-directifs avec cinq pilotes (P1 à P5) ayant au moins 50 heures

d'expérience de vol et une moyenne de 4600 heures (min = 50, max = 12000, SD = 4155). Nous avons choisi de mener ces entretiens dans l'objectif de mieux comprendre le contexte de vol de l'aviation légère, ainsi que de clarifier les besoins des pilotes. Le questionnaire portait sur les habitudes et les outils utilisés par les pilotes pour mémoriser des informations en vol et les récupérer pas la suite. Nous avons observé que seulement certains pilotes (en particulier les pilotes les moins expérimentés) prennent des notes manuscrites pendant les vols. Ils utilisent une symbologie personnelle, par exemple certains soulignent les informations importantes, d'autres les entourent ou rayent au fur et à mesure les informations dont ils jugent ne plus avoir besoin, certains utilisent également des pictogrammes, dessinés à la main, pour mettre en évidence les éléments jugés importants.

4.2 Brainstormings

Afin de recueillir plus d'informations sur la manière et le moment où les pilotes ont besoin de mémoriser des informations et de faire émerger des idées pour un assistant mobile, nous avons mené deux séances de brainstorming avec huit pilotes (P1, P3, P4, P6, P7, P8, P9 et P10), répartis en deux groupes de quatre participants. Trois animateurs étaient présents lors de chaque session. Du fait des restrictions sanitaires, les deux sessions ont du être menées virtuellement, en utilisant des outils de vidéoconférence et des Miro Boards³.

Les participants ont d'abord été invités à répondre à la question suivante : "Quel dispositif imaginez-vous lorsque vous devez mémoriser des informations (comme par exemple la consigne d'un contrôleur aérien) et les réutiliser par la suite?". A l'issue des dix minutes de réflexion laissées aux participants, ces derniers ont partagé leurs idées. Pour finir, les participants ont voté pour les trois idées qu'ils considéraient comme les plus pertinentes. Nous leur avons ensuite posé la question inverse : "Quel dispositif est inefficace lorsque vous devez mémoriser des informations et les retrouver par la suite". Les participants ont eu dix minutes supplémentaires pour répondre avant d'en discuter ensemble et de voter pour les suggestions les plus pertinentes.

Les réponses que nous avons recueillies peuvent être résumées comme suit : le système doit être utilisable sans aucune formation. En effet, les pilotes de l'aviation générale ne recevront pas de formation spécifique pour ce système. Il ne doit pas être intrusif (et en particulier il ne doit pas surcharger les canaux visuels et auditifs qui sont déjà fortement utilisés dans le cockpit). Il doit être rapide (dans un contexte critique comme celui de l'aviation, les pilotes ne peuvent se permettre aucun retard) et adapté à une utilisation opérationnelle.

De cette session de brainstorming, nous avons choisi d'exclure le feedback auditif, les pilotes l'ayant explicitement mentionné. Nous avons également décidé d'utiliser une carte géographique, conformément aux applications existantes. De plus, nous souhaitons inclure certaines informations automatiques afin d'accélérer la recherche d'informations.

³<https://miro.com/>

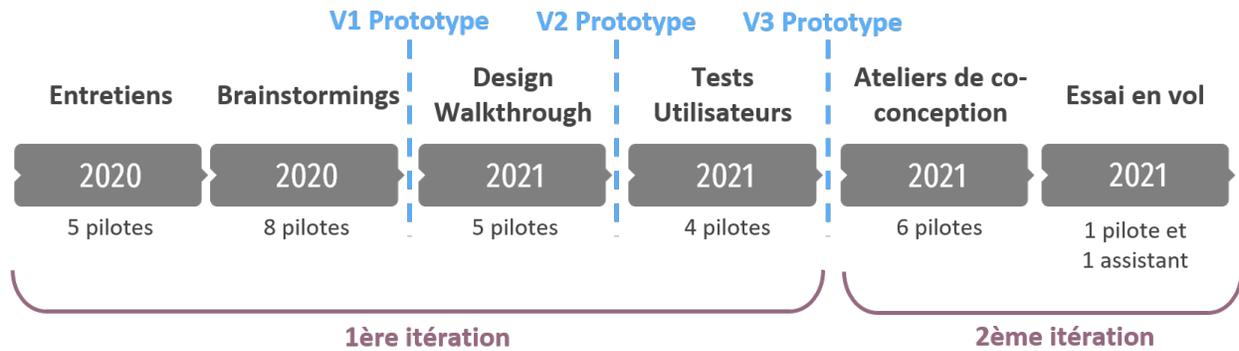


FIGURE 2: Frise chronologique des étapes de conception participative avec des pilotes sur deux itérations.

4.3 Première version de FlyMate

Les entretiens et brainstormings réalisés avec les utilisateurs nous ont permis de concevoir une première version d'un prototype d'aide à la navigation aérienne que nous avons appelé FlyMate (le prototype s'appelait initialement *BLEXVFR* [33]).

4.4 Design walkthrough

Afin d'obtenir un premier retour d'expérience de la part des pilotes, nous avons organisé des séances de design walkthrough avec la première version de notre prototype. L'objectif de cette étape était d'identifier autant de problèmes que possible avant d'implémenter une nouvelle version ou de continuer à itérer sur le prototype. Cinq pilotes ont participé à cette étape du processus (P3, P6, P7, P8 et P9). Chacun d'entre eux a passé en revue les fonctionnalités de manière systématique avec l'aide des animateurs. Une session a été réalisée en ligne, et quatre sessions ont été réalisées en présentiel. Le design walkthrough nous a permis d'identifier une liste de corrections à apporter avant l'implémentation d'une nouvelle version du prototype.

4.5 Deuxième version de FlyMate

Sur la base des commentaires recueillis lors des séances de design walkthrough, nous avons effectué une autre itération. Nous avons ajouté des marqueurs de navigation sur la carte (points de report VFR2, aérodromes, etc.). Ces marqueurs sont des points de référence pour les pilotes pendant leur navigation. Nous avons remplacé notre fond de carte par une carte plus connue des pilotes de l'aviation générale (SDOACI). Nous avons également apporté des modifications au panneau d'information de vol. Les pilotes ont considéré que la latitude et la longitude n'étaient pas utiles, nous les avons donc supprimées. Pour finir, nous avons ajouté la possibilité de programmer des rappels au moyen d'un geste circulaire autour du point concerné.

4.6 Etude préliminaire

Ensuite, quatre utilisateurs (P1, P3, P7 et P8) ont participé à une évaluation préliminaire en simulateur d'avion. A ce stade du projet, nous souhaitions comparer notre prototype à une application existante et très utilisée par les pilotes : SDVFR. L'objectif de cette

étude était de vérifier que notre prototype était au moins équivalent, en termes d'utilisabilité, d'expérience utilisateur et de charge de travail perçue, aux autres applications déjà utilisées par les pilotes.

4.6.1 Déroulement. Pour ce faire, nous avons demandé aux utilisateurs de réaliser deux vols équivalents en termes de durée et de difficulté, un à l'aide de l'application de référence (condition de contrôle) et l'autre avec notre prototype. Cette étude a été menée en utilisant le simulateur de vol amateur Microsoft Flight Simulator 2020 sur un ordinateur. Le simulateur était relié aux commandes de vol (Honeycomb Alpha Flight Controls). Notre prototype et l'application de référence ont été affichés sur une tablette HUAWEI MediaPad M5. A l'issue de chaque vol, nous avons demandé aux participants d'évaluer leur charge de travail perçue à l'aide du formulaire NASA-TLX [20], leur expérience utilisateur à l'aide de l'Attrakdiff [21, 23] ainsi que l'utilisabilité du système à l'aide du questionnaire SUS [7] tous traduits en français.

En effet, nous voulions nous assurer que le pilote était capable d'effectuer les tâches courantes de pilotage de manière équivalente avec notre application qu'avec une application de référence (mesure de l'utilisabilité des 2 systèmes), vérifier l'intérêt des nouvelles fonctionnalités proposées par notre application (mesure de l'expérience utilisateur) et nous assurer que notre application n'ajoutait pas de complexité à la tâche primaire de pilotage (mesure de la charge mentale).

4.6.2 Résultats. Nous avons utilisé l'échelle d'utilisabilité définie par Bangor et al. [2] pour évaluer les résultats du SUS. Les scores obtenus pour les deux prototypes étaient supérieurs au niveau acceptable (SDVFR : moyenne = 70, sd = 12,9; FlyMate : moyenne = 89,4, sd = 0,5).

Le questionnaire Attrakdiff nous a fourni une mesure quantitative de l'expérience utilisateur en quatre critères : 1) la qualité pragmatique (FlyMate = 2, SDVFR = 0,8), 2) la qualité de stimulation hédonique (FlyMate = 0,5, SDVFR = -0,1), 3) la qualité d'identité hédonique (FlyMate = 0,6, SDVFR = 0), et 4) l'attractivité globale (FlyMate = 1,8, SDVFR = 0,9). Les scores entre 0 et 1 montrent que le système remplit sa fonction (les deux échelles hédoniques pour FlyMate). Les scores supérieurs à 2 indiquent un point fort du système, ce qui est le cas pour la qualité pragmatique de FlyMate.

TABLE 2: NASA-TLX Scores

	FlyMate	SDVFR
Mental Demand	17.5	42.5
Physical Demand	10	17.5
Temporal Demand	18.8	17.5
Performance	17.5	30
Effort	25	32.5
Frustration	32.5	38.8

Dans notre test, aucun des systèmes n'a obtenu de score négatif, qui indiqueraient des points faibles.

Nous avons également mesuré la charge de travail perçue à l'aide du questionnaire NASA-TLX. Les scores de chaque sous-échelle sont présentés dans le Tableau 2. Pour cette première version de FlyMate, nous souhaitions que la charge de travail perçue soit inférieure ou égale à celle perçue avec SDVFR. La seule sous-échelle qui ne répond pas à cette attente est la "Demande temporelle". Nous pensons que cela s'explique par les fonctions de rappel (ou d'alerte) de FlyMate qui exigent une action immédiate de la part du pilote (fonctionnalité n'étant pas présente dans SDVFR).

4.7 Troisième version du prototype

Suite aux retours des tests utilisateurs, nous avons identifié des modifications sur l'interface et les avons implémentées dans une troisième version du prototype. Nous avons entre autres ajouté des informations à la ligne de temps (cf. fig. 1, point 3) telles que le nombre de minutes séparant les différentes étapes, les caps à suivre à chaque étape et nous avons permis à l'utilisateur d'enregistrer ses données de navigation pour les retrouver par la suite.

4.8 Séances de co-conception

Pour recueillir du feedback des utilisateurs sur la troisième version de notre prototype, nous avons organisé deux séances de co-conception avec six pilotes d'aviation légère (quatre pilotes ont assisté à la première séance, et deux pilotes à la deuxième). Ces séances avaient pour but de faire tester aux utilisateurs toutes les fonctionnalités de FlyMate et d'en discuter de manière systématique.

Chaque séance comprenait une démonstration de l'application, un vol sur simulateur durant lequel les pilotes pouvaient manipuler l'application en conditions réalistes, et une séance de discussion avec tous les participants de la session. Nous avons conclu ces séances par une phase d'idéation, en demandant aux participants d'imaginer les gestes (ou signes) qu'ils aimeraient dessiner pour déclencher certaines actions.

4.8.1 Démonstration de l'application. Nous avons débuté chaque séance par l'accueil des participants et par une démonstration de l'application (environ 15 minutes). L'expérimentateur passait en revue toutes les fonctionnalités de l'application, de manière exhaustive. Les participants étaient libres de poser autant de questions que nécessaires.

4.8.2 Vol sur simulateur. Nous avons ensuite répartis les participants sur les postes de simulation de sorte à retrouver, à chaque

poste, un pilote et un assistant. Nous avons deux postes de simulation à disposition. Les équipes ont effectué deux vols, prenant tour à tour les rôles de pilotes et d'assistants. Les simulations ont été réalisées à l'aide du simulateur de vol amateur Microsoft Flight-Simulator2020 sur un ordinateur. Les participants étaient assis face à l'écran, à une distance confortable (fig. 3). Le poste de simulation était connecté à des palonniers et à un manche Honeycomb Alpha Flight Controls. Notre application était installée sur une tablette HUAWEI MediaPad M5. Les utilisateurs qui n'étaient pas familiers de l'environnement de simulation ont pu effectuer un tour de piste. Nous avons fourni aux participants des scénarios de vols à réaliser. Les scénarios ont été conçus de sorte à utiliser toutes les fonctionnalités du prototype comme par exemple programmer un rappel ou effectuer un déroutement. Les participants ont tous réalisé un vol d'environ 15 minutes, avec plusieurs tâches à réaliser, en particulier une demande de déroutement. Ils n'avaient pas de consigne sur le positionnement de la tablette et pouvaient la placer et la manipuler sans contraintes. Un utilisateur a posé la tablette à plat, à côté du yoke, tous les autres l'ont positionnée à plat directement sur le yoke (cf fig. 3).



FIGURE 3: Participant sur simulateur avec la tablette posée sur le yoke.

4.8.3 Discussion. Une fois les vols réalisés, nous avons réuni tous les participants de la même session (4 à la première et 2 à la deuxième) afin de discuter collectivement du prototype. Nous avons questionné les utilisateurs sur leur expérience globale vécue avec FlyMate et pris des notes retranscrivant ces discussions afin de pouvoir les analyser. Le tableau 3 synthétise ces observations.

Nous avons tout d'abord questionné les utilisateurs sur le positionnement de la tablette et en particulier où la positionnent-ils habituellement lorsqu'ils prennent place dans le cockpit. Certains utilisateurs fixent la tablette ainsi que la documentation de vol à leur cuisse au moyen d'un kneeboard (cf fig. 9). Certains utilisateurs en revanche fixent la tablette à la vitre au moyen d'une ventouse. Ils nous ont indiqué qu'ils auraient aimé pouvoir positionner la tablette sur leur cuisse (cette position n'était pas possible durant le test sur le simulateur car il était impossible de fixer la tablette). P17 nous a expliqué qu'en positionnant la tablette sur le yoke plutôt que

sur sa cuisse, il peut comparer rapidement les écarts de cap affichés entre le simulateur et l'application, son parcours visuel est réduit, s'il avait positionné la tablette sur sa cuisse, la distance visuelle à parcourir aurait trop grande pour comparer aisément deux valeurs. Tous les utilisateurs ont interagît avec la tablette à l'aide d'une seule main, en gardant toujours une main sur le yoke.

Les utilisateurs ont souligné l'importance de l'assistance que doit offrir l'application au pilote dans les situations critiques, nécessitant une prise de décision rapide, une réorganisation et repriorisation des actions initialement prévues.

Les utilisateurs ont également évoqué les limitations liées au contexte, en particulier l'utilisation du tactile ou de l'interaction gestuelle dans un environnement turbulent ou stressant. P16 nous indique : "Cela m'est déjà arrivé de trembler parce que j'étais dans une situation pas terrible".

Nous avons ensuite discuté avec eux des fonctionnalités qui leur semblaient indispensables. La première fonctionnalité importante citée par les participants était le vecteur de vitesse (point 5 dans fig. 1), qui représente visuellement la position de l'avion dans 2, 3, 5 et 10 minutes. Par exemple, P16 a indiqué que "Le temps c'est super, je vois tout de suite qu'il me reste 3 minutes [avant d'arriver sur ce point d'intérêt]". Les participants ont en particulier souligné l'importance, pour les vols à vue (VFR), de se repérer dans l'espace et le temps. Les participants nous ont expliqué avoir utilisé le vecteur vitesse de 2 façons : à partir de l'avion ("où sera mon avion dans 3 minutes?") et à partir d'un point d'intérêt ("combien de temps me reste-t-il avant d'arriver à ce point?"). P17 nous explique avoir regardé le vecteur de vitesse pour vérifier s'il avait le temps de faire quelque chose avant d'arriver à un point d'intérêt ainsi que pour estimer le nombre de minutes restantes avant de devoir contacter le contrôle aérien au survol d'un point précis. Les participants ont en revanche exprimé des désaccords sur le nombre de valeurs à afficher sur le vecteur. P11 nous indique que "Le point à 3 minutes ne sert à rien, 2, 5 et 10 c'est très bien pour moi". En revanche, P12 lui a répondu "Moi j'aime bien les vecteurs à 2, 3 et 5 minutes, je le trouve bien utile le 3 minutes". Nous en concluons qu'il est important de laisser le choix aux utilisateurs quant aux valeurs à afficher.

Nous les avons ensuite interrogés sur les fonctionnalités qu'ils auraient aimé trouver sur l'application. Les participants auraient aimé avoir la possibilité de visualiser le tracé de la trajectoire déjà effectuée par l'avion. Ils ont également évoqué la possibilité de déplacer les points de la navigation directement sur la carte, par manipulation directe. Cette fonctionnalité serait notamment utile lors de l'arrivée sur un aéroport, au moment où les pilotes doivent s'intégrer dans le circuit de l'aéroport en suivant les consignes des contrôleurs aériens. Les participants ont également mis en évidence le manque d'informations relatives à l'élévation de l'avion ainsi que les hauteurs de survol minimales des zones. L'accès à la liste de tous les aéroports se trouvant à proximité de la position de l'avion est également un élément que les participants auraient aimé pouvoir consulter directement sur l'application.

Les participants nous ont ensuite indiqué ce qui leur avait déplu lors de l'utilisation de FlyMate. Certains paramètres, évoluent de manière continue. Par exemple, la couleur du niveau de carburant évolue du vert au rouge de manière continue. Les utilisateurs nous ont indiqué ne pas avoir remarqué ce changement. Les participants

TABLE 3: Synthèse des observations du vol sur simulateur

Thème	Synthèse
Fonctionnalités	Vecteur de vitesse à garder impérativement
Informations à présenter	Tracé de la trajectoire derrière l'avion. Elevation de l'avion. Hauteur de survol minimale des zones. Liste des aéroports à proximité.
Interaction tactile	En vol : tablette fixée à la vitre avant ou à la cuisse. Sur simulateur : tablette posée devant l'utilisateur sur une surface plane. Une seule main interagît avec la tablette (l'autre main est toujours sur le yoke). Manipulation directe (déplacer les points de la navigation directement sur la carte)
Personnalisation	Laisser la possibilité de personnaliser les valeurs affichées (p.ex. sur le vecteur de vitesse)
A éviter	Evolution continue des paramètres trop subtile

nous ont également indiqué ne pas pouvoir basculer facilement entre la carte principale de navigation et la carte VAC de l'aéroport désiré. Par exemple, P1 constate "on a besoin de faire des allers-retours entre les 2". En effet, lors d'une approche sur un aéroport, les pilotes sont en contact permanents avec les contrôleurs aériens et doivent s'adapter à leurs consignes. P11 nous explique : "sur mon dernier vol la contrôleuse m'a beaucoup bousculé, donc j'ai fait beaucoup d'allers-retours sur la VAC, le switch est très important".

Nous avons conclu la discussion en évoquant l'affichage de l'estimation du carburant. FlyMate propose aux pilotes une estimation du carburant restant dans chaque réservoir et offre la possibilité à l'utilisateur de programmer un rappel lorsque le niveau de carburant franchit un certain seuil. En effet, FlyMate n'étant pas connecté au système avionique, il ne peut proposer qu'une estimation de certains paramètres. Certains utilisateurs nous ont dit ne pas vouloir de cette information et considéraient qu'il pouvait être dangereux de l'afficher. En effet, les utilisateurs nous ont questionné sur notre méthode d'estimation du carburant restant. Le fait que ce calcul ne soit pas transparent (l'application ne donne pas d'informations sur la manière dont elle estime le carburant) pose un problème aux pilotes qui nous expliquent que le niveau de carburant est une information élémentaire et que l'automatiser représente un risque non négligeable, P14 nous dit qu'il est important que le pilote fasse les calculs d'estimation de carburant de manière volontaire. P16 en revanche insiste sur la nécessité d'avertir le pilote en cas de faible niveau de carburant et nous dit avoir déjà oublié de basculer de réservoir en cours de vol : "Je crois que c'est l'essence qu'on oublie le plus, le switch des réservoirs d'essence, cela m'est arrivé assez souvent".

4.9 Etude d'élicitation des gestes

Comme indiqué dans l'état de l'art (2.2.3), l'interaction gestuelle peut présenter une alternative pertinente dans des situations où l'utilisateur ne peut pas regarder la surface d'interaction. Nous souhaitons ensuite identifier quels gestes seraient pertinents pour déclencher les trois actions suivantes :

- Afficher les cartes VAC d'un aérodrome ;
- Programmer un rappel pour contacter le contrôle aérien à un certain point ;
- Effectuer un "GO-TO" (se dérouter vers un aérodrome non prévu).

Ces trois actions sont effectuées à un point précis. En effet, pour l'affichage des cartes VAC et le déroulement, on considère un aérodrome à une position donnée. Le rappel à programmer se fait quant à lui sur un point d'intérêt précis. Nous avons ainsi proposé aux utilisateurs de tracer les gestes qui leur semblaient les plus appropriés pour chacune des actions, selon la méthode d'élicitation de gestes proposée par Wobbrock et al. [41]. Les méthodes d'élicitation de gestes permettent de guider la conception d'interfaces en permettant aux utilisateurs de proposer un geste associé à une action précise. L'animateur de la séance montre l'effet désiré d'une action aux participants et ces derniers dessinent des gestes qui produiraient cet effet. Un score de consensus (agreement score) est ensuite calculé entre les gestes des participants [40]. Nacenta et al. [28] ont démontré que les gestes définis par les utilisateurs sont plus rapides à apprendre et plus faciles à retenir.



FIGURE 4: Participant dessinant le geste associé à l'action "Rappel"

Pour mettre les utilisateurs dans la situation réelle, nous avons développé une application qui reproduit le visuel de notre prototype. Les participants ont donc l'impression de saisir le geste sur l'interface de l'application (cf fig. 4). Pour nous permettre de récolter et réutiliser facilement ces résultats, l'application enregistre les coordonnées des points qui composent le signe dessiné par l'utilisateur. Nous avons également filmé les mains des participants. En raison du faible nombre de gestes à dessiner et de participants, nous n'avons pas calculé de score de consensus, mais effectué une analyse qualitative.

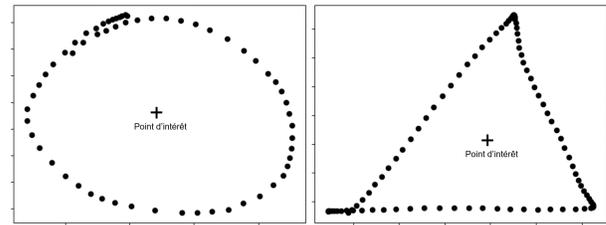


FIGURE 5: Exemple de tracés de geste pour la fonctionnalité "Rappel" : les utilisateurs (P12 à gauche, P16 à droite) tracent une forme géométrique autour d'un point d'intérêt.

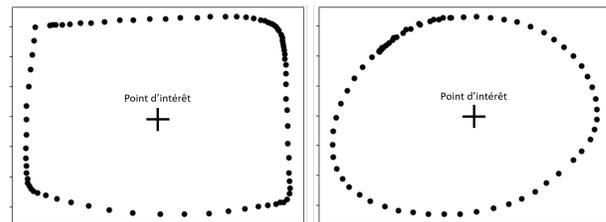


FIGURE 6: Exemple de tracés de geste pour la fonctionnalité "Afficher les cartes VAC" : les utilisateurs (P13 à gauche, P17 à droite) tracent encore une forme géométrique autour d'un point d'intérêt.

4.9.1 Afficher les cartes VAC et programmer un rappel. Nous avons observé que les gestes tracés par les utilisateurs pour les fonctionnalités "afficher les cartes VAC d'un aérodrome" et "programmer un rappel à un point" sont semblables. La figure 5 illustre deux exemples de tracés pour la fonctionnalité "Rappel". Le tracé de gauche a été effectué par P12, celui de droite par P16. Les utilisateurs ont tous entouré ou tracé rapidement une forme géométrique autour du point d'intérêt pour la fonctionnalité de rappel.

La figure 6 illustre deux exemples de tracés pour la fonctionnalité "Afficher les cartes VAC". Le tracé de gauche a été effectué par P13, celui de droite par P17. Pour l'affichage des cartes VAC, un participant a effectué un appui long directement sur le point, un participant a dessiné une forme de V dont la pointe désignait le point d'intérêt, tous les autres participants ont entouré ou tracé rapidement une forme géométrique autour du point d'intérêt.

4.9.2 Effectuer un "GO-TO". Nous observons une différence dans les propositions de gestes des utilisateurs pour la fonctionnalité "effectuer un GO-TO" (fig. 7). En effet, bien que le "GO-TO" concerne lui aussi un point précis (le pilote se déroute vers un aérodrome donné), les gestes proposés par l'utilisateur sont différents que pour les deux autres fonctionnalités. On peut remarquer que le premier point tracé par l'utilisateur pour initier le geste se trouve à la position de l'avion. Les utilisateurs tracent ensuite une droite vers l'aérodrome de déroulement. On observe ici un lien sémantique fort entre la signification de l'action (amener l'avion vers un nouvel aérodrome) et le geste dessiné.

Bien que les gestes tracés par les utilisateurs pour cette fonctionnalité ne soient pas tous identiques (on trouve des flèches et des

lignes droites par exemple), tous les utilisateurs ont en revanche utilisé cette sémantique.

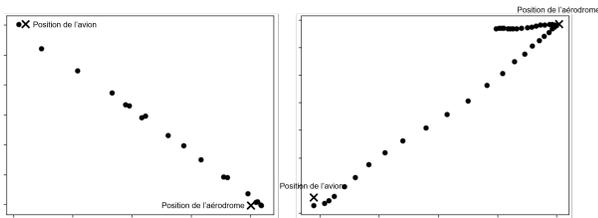


FIGURE 7: Exemple de tracés de geste de P12 pour la fonctionnalité "GO TO"

4.9.3 Observations. On observe chez les pilotes deux stratégies différentes quant à l'utilisation de l'interface gestuelle. La première consiste à effectuer des gestes très rapides et très simple, comme par exemple entourer un point d'intérêt par une forme géométrique simple, pour effectuer une action. En effet, ces gestes sont rapides et faciles à effectuer et rarement exécutés de manière involontaire. Une autre stratégie consiste à créer un lien sémantique entre le geste et l'action qu'il déclenche. On voit par exemple les utilisateurs dessiner des flèches pour indiquer des directions (en particulier dans le cas de la fonctionnalité "GO-TO"). En effet, bien qu'il suffirait d'indiquer au système le point vers lequel le pilote souhaite se dérouter (le système connaît déjà la position de l'avion), les utilisateurs ont privilégié l'option sémantique en représentant le mouvement de l'avion (au moyen d'un segment qui a pour extrémités la position de l'avion et la position vers lequel il souhaite se dérouter) vers le nouveau point d'intérêt.

Plusieurs pilotes ont cependant précisé oralement qu'ils avaient tracé des gestes pour répondre à la consigne mais qu'ils préfèrent les interactions simples, comme par exemple un double tap.

Ces observations nous indiquent que dans le contexte du pilotage, il est préférable de privilégier des gestes simples (comme le tap ou le double tap). En revanche, si un geste plus complexe est nécessaire, un geste sémantiquement lié à l'action qu'il déclenche peut être utilisé.

4.10 Essai en vol

Pour conclure cette itération de notre prototype, nous l'avons ensuite testé lors d'un vol réel dans un avion de tourisme monomoteur de type TB 10 (cf fig. 8). Les pilotes qui ont testé FlyMate en conditions réelles ont participé au développement du prototype. Pour des raisons de sécurité, la personne qui manipulait la tablette sur laquelle se trouvait FlyMate n'était pas le pilote de l'avion. La personne qui avait en main le prototype n'avait pas de consigne particulière quant aux tâches à réaliser. Elle a choisi de positionner la tablette sur sa cuisse et nous a indiqué s'être servi de l'application pour identifier les fréquences radio, programmer des rappels pour le niveau de carburant et calculer des estimées de temps et de distance.

Les participants ont estimé que l'application leur permettait d'effectuer ces tâches et se sont montrés enthousiastes quant à l'utilisation de l'application en vol.

En particulier, les pilotes ont souligné que les données estimées étaient suffisamment précises pour pouvoir permettre une navigation à l'estime (donc sans GPS). Les rappels de tâches à effectuer (comme changement de réservoir par exemple) étaient utiles surtout aux moments de forte charge cognitive. Les pilotes nous ont également rapporté que la lecture des informations de navigation était aisée et rapide, n'interférant ainsi pas avec le vol.

Cependant, les pilotes ont également identifié des points à améliorer. Premièrement, une vraie gestion des espaces serait appréciée, c.a.d., obtenir des notifications si on rentre dans des zones interdites ou nécessitant clearance et avoir un outil montrant une coupe verticale des espaces au-dessus d'un point donné. Un point important concerne aussi la gestion des cartes VAC qui est à améliorer par exemple par un téléchargement automatique des cartes VAC alentours et la gestion des versions. Les performances et la réactivité de l'application sont adéquates mais améliorables. En perspective, il serait intéressant de rajouter des feedbacks autre que visuel, par exemple par le rajout de vibrations sur la tablette ou une smart-watch.



FIGURE 8: A gauche : l'avion utilisé pour l'essai en vol. A droite : l'utilisation du prototype en vol.

5 RECOMMANDATIONS DE DESIGN

Suite aux retours des pilotes que nous avons récoltés lors des différentes phases de conception, nous proposons des recommandations pour la conception d'applications d'aide à la navigation aérienne.

5.1 Fonctionnalités

Notre première recommandation concerne les fonctionnalités que doit proposer une application d'aide à la navigation aérienne. En effet, les participants ont souligné l'importance de l'assistance que doit offrir l'application au pilote dans les situations critiques. Par exemple, lorsque l'aérodrome prévu pour l'atterrissage est inaccessible, l'application doit permettre au pilote de trouver rapidement une alternative (c'est-à-dire proposer un terrain sur lequel il est possible d'atterrir) et l'aider à effectuer son déroulement (guider le pilote jusqu'au terrain). Il faudrait pouvoir basculer facilement entre les cartes VAC et la vue du vol en cours.

Le vecteur de vitesse indiquant la future position de l'avion est également un élément essentiel car il permet au pilote de se repérer rapidement dans le temps, en particulier lorsqu'il planifie une action à venir. A ce titre, l'affichage de la trajectoire déjà effectuée derrière l'avion est également pertinent.

L'affichage du carburant est également une information essentielle pour le pilote. En revanche, il est indispensable d'indiquer explicitement s'il s'agit d'une estimation (auquel cas il faut laisser la possibilité au pilote de l'afficher ou non) ou d'une valeur réelle.

D'autres informations que certains pilotes auraient appréciés incluent l'élevation de l'avion, la hauteur de survol minimale des zones ainsi que la liste des aérodromes à proximité.

5.2 Présentation des informations

Un des défis majeurs lors de la conception d'outils d'assistance pour les pilotes est de minimiser le temps passé à regarder et interagir avec le dispositif. En effet, en particulier pour les vols à vue (VFR), les pilotes doivent regarder en permanence à l'extérieur pour se situer dans l'espace. Il est donc impératif de leur fournir un accès direct aux informations nécessaires comme par exemple la liste des aérodromes les plus proches, dernière VAC consultée etc.

De plus, les changements de l'interface qui sont porteurs d'informations doivent être clairement identifiables [3, 30, 34]. Les changements continus (tel que le changement continu de couleur pour indiquer la quantité d'essence dans le réservoir) doivent être évités pour permettre au pilote de les identifier sans avoir à fournir un effort d'attention supplémentaire.

5.3 Techniques d'interactions

Les observations que nous avons menées ainsi que les retours des pilotes lors de la séance de discussion et la gesture elicitation study nous permettent de conclure que les pilotes ont une préférence pour des interactions gestuelles simples et rapides (comme le double tap par exemple ou l'entourage d'un point). En revanche, si un geste plus complexe est nécessaire, un geste sémantiquement lié à l'action qu'il déclenche (comme par exemple une flèche qui indique le point de départ et la direction à suivre) peut être utilisé. Cockburn et al. ont étudié différentes méthodes de saisie de texte sur écran tactile dans un environnement turbulent [10] et ont proposé le système Braced Touch [11] permettant de stabiliser l'interaction.

La manipulation directe (p.ex. déplacer des points sur la carte) serait également appréciée par les pilotes.

Nous conseillons en outre aux concepteurs de prendre en compte le fait que les tablettes peuvent être posées soit sur la cuisse (fig. 9), soit sur la vitre avec une ventouse, ce qui modifie la position dans laquelle les pilotes interagissent avec la tablette et par conséquent la position de leurs mains.

5.4 Personnalisation

Les pilotes travaillent de plus en plus avec des outils numériques. Ces outils sont aujourd'hui inclus dans la plupart des formations, cependant leur usage n'est pas standardisé. Par conséquent, les pilotes ont des usages et des préférences qui diffèrent concernant l'utilisation des aides numériques (de la même manière que le grand public peut présenter des préférences différentes d'utilisation). Par exemple, certains pilotes souhaitent avoir le vecteur de vitesse pour 2, 3, 5 et 10 minutes quand d'autres trouvent cela trop détaillé. Certains veulent voir affichées des informations sur le carburant quand d'autres trouvent cette option dangereuse. Il est donc important de laisser l'utilisateur personnaliser l'interface afin de mieux répondre



FIGURE 9: Tablette fixée par un kneebord

à ses besoins et préférences. Cette recommandation correspond également au critère d'adaptabilité de Bastien et Scapin [4].

6 DISCUSSION ET PERSPECTIVES

La démarche de conception participative adoptée pour ce projet nous a permis de comprendre en détails les besoins des utilisateurs. Nous avons raffiné cette caractérisation tout au long de la conception ce qui nous a permis de développer un outil d'assistance qui réponde aux besoins réels des pilotes. De plus, l'implication des pilotes tout au long du processus de conception, et en particulier leurs retours et les observations que nous avons pu réaliser des pilotes manipulant le prototype nous ont permis d'identifier un ensemble de recommandations à prendre en compte lors du développement d'applications d'aide à la navigation aérienne. Les recommandations que nous fournissons (concernant fonctionnalités, présentation des informations, techniques d'interaction et personnalisation) vont au delà des applications existantes que certains des pilotes participant à nos études utilisent.

Bien qu'il soit difficile de mener la conception participative avec des utilisateurs aussi spécifiques et occupés que les pilotes, nous avons pu trouver seize pilotes motivés pour participer à nos études. Nous avons en effet observé un grand enthousiasme parmi les participants pour le développement d'assistants numériques leur facilitant les vols.

Cependant, il restent certaines limitations à nos travaux. L'utilisation de FlyMate n'a pas pu être formellement testée en conditions réelles, notamment lors de turbulences. Il est cependant connu que les turbulences ont un impact sur l'utilisation de support tactiles [10]. Un travail additionnel est donc nécessaire pour consolider ces résultats. De plus, les pilotes ont utilisé FlyMate dans un environnement de simulation dans le cadre d'un scénario construit dans le but de permettre au pilote de tester toutes les fonctionnalités mais ne permettant pas de faire varier significativement la charge mentale. Or, la charge mentale des pilotes varie énormément au cours d'un vol et influe fortement sur l'utilisation des outils [22, 31]. Nous prévoyons donc de compléter ces résultats en menant des

tests utilisateurs contrôlés avec de plus nombreux utilisateurs pour évaluer notre prototype.

Suite aux feedbacks exprimés par les pilotes lors des tests, nous prévoyons également d'améliorer le prototype en y ajoutant une visualisation des espaces aériens (par exemple notifier le pilote lorsqu'il pénètre une zone interdite ou nécessitant une autorisation de la part du contrôle aérien). Nous compléterons également le prototype en y ajoutant une coupe verticale qui permette de visualiser les différents espaces de vol au-dessus d'un point donné. Un point qui a souvent été souligné par les pilotes est l'accès aux cartes VAC des aéroports alentours qui devra être facilité. Cet aspect a une grande importance pour les pilotes car ils ont souvent besoin d'accéder aux cartes VAC dans des situations critiques ou stressantes, comme le déroutement à un autre aéroport que celui prévu initialement. Enfin, nous améliorerons la gestion des notifications du prototype, en particulier en testant l'appart d'un retour haptique.

7 CONCLUSION

Dans ce papier, nous avons présenté FlyMate, un prototype d'aide à la navigation aérienne s'adressant aux pilotes de l'aviation générale, et leur permettant de préparer le vol en amont, obtenir des informations durant le vol et programmer des alarmes. Nous avons mis en place une démarche de conception participative tout au long du projet avec seize pilotes d'aviation générale afin de concevoir un prototype qui répond à leurs besoins. Concevoir cette application avec des pilotes nous a permis d'identifier des axes d'améliorations ainsi que de formuler des recommandations de design concernant les fonctionnalités, la présentation des informations, les techniques d'interaction et personnalisation qui peuvent être utilisées pour la conception de futures applications mobiles d'aide à la navigation aérienne.

REMERCIEMENTS

Nous remercions chaleureusement les utilisateurs qui ont accepté de participer aux ateliers de conception. Merci à Lucia Alonso Duran, Xavier Carrau, Emeric Delacroix et Baptiste Guilbert pour leur travail sur les premières itérations. Nous adressons également nos chaleureux remerciements aux développeurs de SDVFR pour leurs aide avec la V2 du prototype, ainsi qu'à Philippe Palanque pour ses retours.

RÉFÉRENCES

- [1] Airmate. [n.d.]. <https://www.airmate.aero/>.
- [2] Aaron Bangor, Philip T Kortum, and James T Miller. 2008. An empirical evaluation of the system usability scale. *Intl. Journal of Human-Computer Interaction* 24, 6 (2008), 574–594.
- [3] Lyn Bartram, Colin Ware, and Tom Calvert. 2001. Moving icons, detection and distraction. (2001).
- [4] Christian Bastien and Dominique Scapin. 1993. *Ergonomic criteria for the evaluation of human-computer interfaces*. Technical Report RT-0156. INRIA. 79 pages. <https://hal.inria.fr/inria-00070012>
- [5] National Transportation Safety Board. [n.d.]. NTSB Issues 2019 – 2020 Most Wanted List of Transportation Safety Improvements. <https://www.ntsb.gov/news/press-releases/Pages/mr20190204.aspx>.
- [6] Andrew Bragdon, Eugene Nelson, Yang Li, and Ken Hinckley. 2011. Experimental Analysis of Touch-Screen Gesture Designs in Mobile Environments. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Vancouver, BC, Canada) (CHI '11). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 403–412. <https://doi.org/10.1145/1978942.1979000>
- [7] John Brooke et al. 1996. SUS-A quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry* 189, 194 (1996), 4–7.
- [8] Juan Angel Lorenzo del Castillo and Nadine Couture. 2016. The Aircraft of the Future : Towards the Tangible Cockpit. In *Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace* (Paris, France) (HCI-Aero '16). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 11, 8 pages. <https://doi.org/10.1145/2950112.2964582>
- [9] Active Checklist. [n.d.]. http://www.skycharts.net/?page_id=1951.
- [10] Andy Cockburn, Carl Gutwin, Philippe Palanque, Yannick Deleris, Catherine Trask, Ashley Coveney, Marcus Yung, and Karon MacLean. 2017. Turbulent touch : Touchscreen input for cockpit flight displays. In *International Conference for Human-Computer Interaction* (CHI 2017). 6742–6753.
- [11] Andy Cockburn, Damien Masson, Carl Gutwin, Philippe Palanque, Alix Goguy, Marcus Yung, Christine Gris, and Catherine Trask. 2019. Design and evaluation of braced touch for touchscreen input stabilisation. *International Journal of Human-Computer Studies* 122 (2019), 21–37. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2018.08.005>
- [12] Louise V. Coutts, Katherine L. Plant, Mark Smith, Luke Bolton, Katie J. Parnell, James Arnold, and Neville A. Stanton. 2019. Future technology on the flight deck : assessing the use of touchscreens in vibration environments. *Ergonomics* 62, 2 (2019), 286–304. <https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1552013> arXiv:<https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1552013> PMID : 30470162.
- [13] Sonia Dodd, Jeff Lancaster, Andrew Miranda, Steve Grothe, Bob DeMers, and Bill Rogers. 2014. Touch Screens on the Flight Deck : The Impact of Touch Target Size, Spacing, Touch Technology and Turbulence on Pilot Performance. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 58, 1 (2014), 6–10. <https://doi.org/10.1177/1541931214581002> arXiv:<https://doi.org/10.1177/1541931214581002>
- [14] Ronald Ecker, Verena Broy, Katja Hertzschuch, and Andreas Butz. 2010. Visual Cues Supporting Direct Touch Gesture Interaction with In-Vehicle Information Systems. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (Pittsburgh, Pennsylvania) (AutomotiveUI '10). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 80–87. <https://doi.org/10.1145/1969773.1969788>
- [15] Pilot Checklists for General Aviation Aircraft. [n.d.]. https://play.google.com/store/apps/details?id=com.leolinerapps.co_pilotchecklist.
- [16] Foreflight. [n.d.]. <https://foreflight.com/>.
- [17] Klaus-Martin Goeters, Peter Maschke, and Hinnerk Eißfeldt. 2004. Ability requirements in core aviation professions : Job analysis of airline pilots and air traffic controllers. *Aviation psychology : Practice and research* (2004), 99–119.
- [18] David Antonio Gómez Jáuregui and Nadine Couture. 2019. Tacsel : Shape-Changing Tactile Screen applied for Eyes-Free Interaction in Cockpit. In *INCOSE Human Systems Integration 2019 (HSI2019)*. Biarritz, France. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02289065>
- [19] Joan M. Greenbaum and Morten Kyng. 1991. *Design at work : cooperative design of computer systems*. L. Erlbaum Associates. 294 pages.
- [20] Sandra G Hart and Lowell E Staveland. 1988. Development of NASA-TLX (Task Load Index) : Results of empirical and theoretical research. In *Advances in psychology*. Vol. 52. Elsevier, 139–183.
- [21] Marc Hassenzahl, Michael Burmester, and Franz Koller. 2003. AttrakDiff : Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität. In *Mensch & computer 2003*. Springer, 187–196.
- [22] P.G.A.M. JORNA. 1993. Heart rate and workload variations in actual and simulated flight. *Ergonomics* 36, 9 (1993), 1043–1054. <https://doi.org/10.1080/00140139308967976> arXiv:<https://doi.org/10.1080/00140139308967976> PMID : 8404833.
- [23] Carine Lallemand, Vincent Koenig, Guillaume Gronier, and Romain Martin. 2015. Création et validation d'une version française du questionnaire AttrakDiff pour l'évaluation de l'expérience utilisateur des systèmes interactifs. *European Review of Applied Psychology* 65, 5 (2015), 239–252.
- [24] 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*. 656–666.
- [25] Yixiang Lim, Alessandro Gardi, Roberto Sabatini, Subramanian Ramasamy, Trevor Kistan, Neta Ezer, Julian Vince, and Robert Bolia. 2018. Avionics Human-Machine Interfaces and Interactions for Manned and Unmanned Aircraft. *Progress in Aerospace Sciences* 102 (2018), 1–46. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.05.002>
- [26] Jing Liu, Alessandro Gardi, Subramanian Ramasamy, Yixiang Lim, and Roberto Sabatini. 2016. Cognitive pilot-aircraft interface for single-pilot operations. *Knowledge-Based Systems* 112 (2016), 37–53. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2016.08.031>
- [27] Mach7. [n.d.]. <https://appli.mach7.com/>.
- [28] Miguel A. Nacenta, Yemliha Kamber, Yizhou Qiang, and Per Ola Kristensson. 2013. Memorability of Pre-Designed and User-Defined Gesture Sets. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Paris, France) (CHI '13). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1099–1108. <https://doi.org/10.1145/2470654.2466142>

- [29] Sylvain Pauchet, Catherine Letondal, Jean-Luc Vinot, Mickaël Causse, Mathieu Cousy, Valentin Becquet, and Guillaume Crouzet. 2018. Gazeform : dynamic gaze-adaptive touch surface for eyes-free interaction in airliner cockpits. In *Proceedings of the 2018 Designing Interactive Systems Conference*. 1193–1205.
- [30] Sotiris Plainis, Ian J Murray, and Kamlesh Chauhan. 2001. Raised visual detection thresholds depend on the level of complexity of cognitive foveal loading. *Perception* 30, 10 (2001), 1203–1212.
- [31] M. De Rivecourt, M. N. Kuperus, W. J. Post, and L. J.M. Mulder. 2008. Cardiovascular and eye activity measures as indices for momentary changes in mental effort during simulated flight. *Ergonomics* 51, 9 (2008), 1295–1319. <https://doi.org/10.1080/00140130802120267> arXiv:<https://doi.org/10.1080/00140130802120267> PMID : 18802817.
- [32] SDVFR. [n.d.]. https://skydreamsoft.fr/fr_FR/page/sdvfr-android.
- [33] Florine Simon, Lucia Alonso Duran, Xavier Carrau, Emeric Delacroix, Baptiste Guilbert, Jean-Paul IMBERT, Mickaël Causse, and Anke M. Brock. 2021. BLEXVFR : Designing a Mobile Assistant for Pilots. In *Adjunct Publication of the 23rd International Conference on Mobile Human-Computer Interaction*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 6, 5 pages. <https://doi.org/10.1145/3447527.3474852>
- [34] Daniel J Simons and Christopher F Chabris. 1999. Gorillas in our midst : Sustained inattention blindness for dynamic events. *perception* 28, 9 (1999), 1059–1074.
- [35] Skydemon. [n.d.]. <https://www.skydemon.aero/>.
- [36] Mark Smith, Louise V. Coutts, and Katherine L. Plant. 2018. Investigating the Usability of Touchscreens in a Turbulent Flight Deck. In *2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. 1–10. <https://doi.org/10.1109/DASC.2018.8569749>
- [37] Jessica J. Tran, Shari Trewin, Calvin Swart, Bonnie E. John, and John C. Thomas. 2013. Exploring Pinch and Spread Gestures on Mobile Devices. In *Proceedings of the 15th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services (Munich, Germany) (MobileHCI '13)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 151–160. <https://doi.org/10.1145/2493190.2493221>
- [38] 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 (Paris, France) (HCI-Aero '16)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 8, 8 pages. <https://doi.org/10.1145/2950112.2964581>
- [39] Yuzhi Wan, Julie C. Prinnet, and Nadine Sarter. 2017. Visual and auditory feedback to improve touchscreen usability in turbulence. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 61, 1 (2017), 89–93. <https://doi.org/10.1177/1541931213601488> arXiv:<https://doi.org/10.1177/1541931213601488>
- [40] Jacob O Wobbrock, Htet Htet Aung, Brandon Rothrock, and Brad A Myers. 2005. Maximizing the guessability of symbolic input. In *CHI'05 extended abstracts on Human Factors in Computing Systems*. 1869–1872.
- [41] Jacob O. Wobbrock, Meredith Ringel Morris, and Andrew D. Wilson. 2009. User-Defined Gestures for Surface Computing. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (Boston, MA, USA) (CHI '09)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1083–1092. <https://doi.org/10.1145/1518701.1518866>