



CandyFly: Flying drones by pilots with disabilities

Jérémie Garcia, Anke Brock

► To cite this version:

Jérémie Garcia, Anke Brock. CandyFly: Flying drones by pilots with disabilities. IHM'20 21 - 32e Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine, Apr 2021, Metz (virtuel), France. 10.1145/3450522.3451322 . hal-03192142

HAL Id: hal-03192142

<https://enac.hal.science/hal-03192142>

Submitted on 4 May 2021

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.

CandyFly : faire voler des drones par des pilotes avec des déficiences

CandyFly: Flying drones by pilots with disabilities

Jérémie Garcia

Anke M. Brock

jeremie.garcia@enac.fr

anke.brock@enac.fr

ENAC - Université de Toulouse

Toulouse, France

ABSTRACT

Flying drones is an increasingly popular but challenging activity. It is even more challenging for users with special needs. In this paper, we present our collaboration with a drone piloting workshop for people with motor and cognitive disabilities to design CandyFly, an application adaptable to the users' abilities. Several piloting workshops allowed pilots to have fun flying drones with CandyFly and allowed us to explore interactions to help pilots and their caregivers. We conclude with a discussion of the adaptations made along three axes: hardware, software and automation; which can be used for the design of future assistance and leisure systems.

CCS CONCEPTS

• **Human-centered computing** → **Accessibility systems and tools; Interactive systems and tools; Empirical studies in accessibility.**

KEYWORDS

Drones, Human-Drone Interaction, Unmanned Aerial Vehicles, Piloting, Automation, Accessibility

ACM Reference Format:

Jérémie Garcia and Anke M. Brock. 2021. CandyFly : faire voler des drones par des pilotes avec des déficiences: CandyFly: Flying drones by pilots with disabilities. In *32e Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM '20.21), April 13–16, 2021, Virtual Event, France*. ACM, New York, NY, USA, 13 pages. <https://doi.org/10.1145/3450522.3451322>

1 INTRODUCTION

Le pilotage de drones dans un contexte de loisir est une activité qui gagne en popularité grâce aux nombreux modèles disponibles sur le marché. Les pilotes utilisent des drones pour prendre des photos, participer à des courses ou juste pour le plaisir de piloter. Dans le domaine de l'Interaction Humain-Machine, l'interaction avec les drones est relativement récente, mais gagne de plus en

plus d'attention [3, 30, 44]. Elle s'applique à des cas d'applications divers comme la navigation [7, 25], l'art [13, 40], ou la photographie [11, 22], et avec des techniques d'interaction diverses [30, 44].

Pour opérer un drone, les pilotes doivent décoller, stabiliser le drone en ajustant la puissance des moteurs, suivre des trajectoires avec des translations et des rotations, et poser l'appareil au sol. Pendant la réalisation de ces tâches, les pilotes doivent surveiller en permanence la localisation du drone dans son environnement, sa vitesse et son énergie pour éviter des dommages ou des accidents. Ces tâches requièrent des capacités perceptives (percevoir la distance, l'altitude, l'orientation) et motrices (savoir déplacer ses membres et faire des mouvements précis) qui rendent l'activité amusante mais qui peuvent être trop importantes pour des personnes atteintes de déficiences motrices et cognitives.

Notre objectif est d'aider les personnes avec et sans déficiences à piloter des drones comme activité de loisir. Ceci répond à un besoin car beaucoup d'activités pour personnes en situation de handicap visent la rééducation ou l'enseignement, mais relativement peu concernent les activités de loisir. Ainsi, l'école des "têtes en l'air" forme des élèves avec des déficiences motrices légères à devenir pilotes de drone professionnels¹. Pourtant, les personnes ayant des déficiences ont aussi des envies de participer à des activités plaisantes et ludiques. Pendant ce projet, nous avons collaboré avec l'association Elheva² pour personnes en situation de handicap et le Fablab Artilect³ qui avaient déjà mis en place des activités de pilotage de drones avec des personnes ayant des déficiences diverses. Le FabLab et l'association souhaitaient de l'aide pour la conception d'interactions adaptées aux participants car les temps passé en l'air par les drones étaient très court, ce qui nuisait au côté "fun" de l'atelier.

Cet article présente nos travaux de conception d'interactions pour des pilotes de drones atteints de déficiences sensorielles, motrices ou cognitives. En particulier, nous avons pu travailler avec 6 pilotes atteints de déficiences. Nous présentons d'abord notre processus de conception itératif au sein d'un atelier de pilotage de drones mis en place par Artilect en collaboration avec Elheva. Des observations nous ont permis d'identifier les besoins des utilisateurs et d'en tirer des exigences. Nous avons ensuite mené plusieurs itérations de conception de CandyFly, une application qui peut adapter le degré de contrôle aux capacités des utilisateurs en tirant parti

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 '20.21, April 13–16, 2021, Virtual Event, France

© 2021 Copyright held by the owner/author(s). Publication rights licensed to ACM.

ACM ISBN 978-1-4503-8362-2/21/04...\$15.00

<https://doi.org/10.1145/3450522.3451322>

¹<http://novap.fehap.fr/candidats/lecole-tetes-lair/>

²<https://elheva.jimdofree.com/https://elheva.jimdofree.com/>

³<https://artilect.fr/>

des pilotes automatiques des drones et de différents périphériques d'entrée. Les prototypes ont été utilisés pendant plusieurs ateliers lors desquels des pilotes avec des déficiences ont réussi à s'amuser en faisant voler différents types de drones. Les pilotes, leurs aidants et les organisateurs de l'atelier nous ont permis d'identifier des limitations et de suggérer des pistes d'amélioration. Nous concluons avec une discussion des axes d'adaptations matérielles, logicielles et d'automatisation mis en oeuvre ainsi que des perspectives d'amélioration de CandyFly, notamment pour faciliter le pilotage et la progression des utilisateurs.

2 ETAT DE L'ART

L'éventail des travaux dans le domaine de l'interaction avec des drones est large mais ne traite pas spécifiquement du pilotage par des personnes avec des déficiences. Ici, nous nous concentrons sur les interactions pour le pilotage, l'adaptation aux personnes avec des déficiences et les méthodologies de conception spécifiques à ces utilisateurs.

2.1 Interaction pour le pilotage de drone

Dans le cadre d'activités de loisirs, comme la prise de photographies aériennes, les courses, les vols acrobatiques ou simplement le vol libre, les drones disponibles dans le commerce peuvent généralement être contrôlés via une radio-commande, une tablette, une application pour smartphone avec des commandes tactiles ou encore une manette de jeu sans fil [24]. Les casques de réalité virtuelle ou augmentée de type Vue à la première personne (First Person View ou FPV) sont également disponibles pour fournir un retour vidéo direct de la caméra du drone. Malgré un flou juridique sur leur légalité [41], l'utilisation de la FPV parmi les pilotes de drone est particulièrement fréquente pour les courses. Piloter un drone dans un contexte de course de drone nécessite des compétences perceptuelles, motrices et cognitives pour faire décoller le drone, le stabiliser, le déplacer et le poser tout en le surveillant pour éviter les collisions et chutes. Si c'est un drone sans stabilisation il peut être très difficile à piloter. En effet, il faut constamment ajuster les commandes sinon le drone risque de dériver, de s'arrêter ou de chuter. La difficulté fait parti du défi et les pilotes de ce type de drones cherchent à relever ce défi. Pour d'autres usages comme la photographie, les drones intègrent souvent un pilote automatique qui stabilise le drone et permet de les contrôler en vitesse, c'est-à dire en donnant une consigne de vitesse, plutôt qu'en puissance des moteurs. Avec le pilote automatique, un drone vole pratiquement tout seul et si les commandes sont lâ  ch  es, le drone restera en place. Ces modèles de drones sont généralement pilotés par des radio-commandes de grandes tailles ou par des applications sur tablette ou un téléphone avec un écran tactile. Pourtant, la modalit   tactile peut poser des problèmes dus au manque de retours proprioceptifs.

Les travaux de la communauté IHM et spécialement de l'Interaction Humain-Drone ont proposé de piloter des drones avec une grande variété de dispositifs d'entrée et de nombreuses techniques d'interactions [44]. Des travaux proposent d'utiliser l'interaction gestuelle avec les mains [9, 10, 31, 32, 42], le corps [34, 38, 39] ou encore les pieds [10, 27]. D'autres interactions s'appuient sur les Interfaces Cerveau-Ordinateur [33] pour piloter des drones sans périphériques physiques ou en utilisant le regards des utilisateurs

[18] en plus des touches du clavier. Pourtant ces travaux visent à faciliter l'exécution de commandes par le ou les drones plutôt qu'assister les pilotes avec des déficiences à progresser.

Des travaux explorent l'usage de drones pour les déficients visuels pour le guidage et la navigation mais pas pour le pilotage [2]. Pour le contexte du handicap, PULSIT [49] propose un gant permettant de piloter un drone et de contrôler sa caméra avec une seule main si le pilote a un handicap physique mais la complexité des commandes et les besoins cognitifs et moteurs restent très important pour des pilotes avec déficiences cognitives ou motrices.

2.2 Interfaces adaptées aux personnes ayant des déficiences

Au sein de l'Interaction-Humain-Machine, le domaine des technologies d'assistance s'intéresse à la création de technologies et techniques d'interaction accessibles aux personnes ayant des besoins spécifiques divers. En général des techniques d'interaction adaptées sont proposées en remplaçant les modalités inutilisables par d'autres modalités. Une solution consiste à utiliser des interfaces du commerce, comme par exemple des trackballs ou l'occulom  trie [23].

Ici nous nous intéressons aux interfaces de contrôle, comme par exemple pour l'interaction avec des robots. Plaisant et al. [36] ont conçu un robot pour la réhabilitation d'enfants qui peut être piloté par des capteurs divers sur le corps des participants. Leur étude montre qu'il vaut mieux utiliser des interfaces sans fils, d'intégrer des interfaces dans des objets agréables à porter comme des bracelets et de décorer les objets avec des éléments qui mettent en évidence le lien avec le robot (p.ex. utilisation d'une icône de main pour indiquer quelle partie de l'interface contrôle la main du robot). Krishnaswamy et Kuber [26] ont exploré l'utilisation d'interaction gestuelle et d'Interfaces Cerveau-Ordinateur pour le pilotage de robots par des personnes ayant des déficiences motrices. Alors que les premières sont aujourd'hui intégrées dans des dispositifs commerciaux, les dernières ne sont pas encore utilisables par le grand public.

Récemment, le Xbox Adaptive Controller a été commercialisé afin de permettre à des joueurs de jeux vidéos avec déficiences d'utiliser des manettes adaptées [29]. Ce dispositif a le grand avantage d'apporter une vraie flexibilité et la possibilité de s'adapter à chaque utilisateur. Bien que cette interface s'adresse aux jeux vidéos, il serait imaginable de l'utiliser pour le contexte de contrôle de robots ou drones.

2.3 Concevoir avec des personnes en situation de handicap

La conception participative et la conception centrée utilisateur sont des méthodes répandues en Interaction Humain-Machine. Elles placent l'utilisateur au centre du processus de conception, depuis l'analyse initiale des besoins des utilisateurs jusqu'aux tests et à l'évaluation [4]. Des méthodes et techniques comme l'observation, le brainstorming, les sondes technologiques [21] et le prototypage itératif doivent être adaptées en fonction de la problématique et du contexte [17]. Phillips et Zhao [35] ont montré que des personnes ayant des besoins spécifiques abandonnent fréquemment des technologies conçues pour eux si leurs besoins et opinions n'ont pas

été pris en compte lors de la conception des systèmes. Il est par conséquent important de permettre à des personnes en situation de handicap de participer à la conception des technologies adaptées [47]. Il a également été démontré qu'il faut impliquer les proches des utilisateurs dans la conception, comme par exemple leurs familles ou des aidants [16, 46].

Les méthodes employées lors de la conception participative ou centrée utilisateur ne sont pas toujours adaptées aux personnes ayant des besoins spécifiques. Bennett et al. [5] ont identifié des difficultés, par exemple en lien avec la communication et la visualisation d'idées, lors de workshops d'idéation avec des personnes ayant des déficiences. Par exemple, les artefacts issus d'une séance de brainstorming ou co-conception reposent souvent sur le sens visuel et ne seront pas accessibles aux personnes déficientes visuelles [6]. En revanche, pour une personne du spectre autistique ou ayant des troubles d'attention il peut être difficile de rester concentré durant une séance d'idéation.

Plusieurs approches permettant d'inclure des utilisateurs aux besoins spécifiques ont été proposées. Henry [20] présente des conseils très pratiques pour inclure des utilisateurs ayant des déficiences divers durant le processus de conception. Shinohara et al. [43] et Rector et al. [37] ont utilisé interviews et observations afin de mieux comprendre les besoins. Metatla et al. [28] proposaient l'utilisation de focus groups et démonstration de technologies. En outre, Metatla et al. ont utilisé des prototypes basse fidélité hautement malléables qu'ils pouvaient facilement adapter aux envies des utilisateurs en temps réel. Albouys-Perrois et al. [1] et Thevin et al. [45] ont conçu des systèmes interactifs accessibles en incluant des utilisateurs tout au long du processus de conception. Finalement, Vigouroux et al. [48] ont mis en œuvre plusieurs outils d'observation qualitative et quantitative pour déterminer des indicateurs multimodaux résultants du croisement de données acquises dans un environnement contrôlé de type Living Lab.

En conclusion de cet état de l'art, malgré des travaux sur le pilotage de drones et une relative variété d'interfaces adaptées aux personnes avec déficiences [26, 29, 36, 49], il n'y a pas, à notre connaissance, d'études qui s'intéressent au pilotage de drones de loisir par des personnes en situation de handicap. Il apparaît également nécessaire d'inclure les utilisateurs ayant des besoins spécifiques dans la conception des technologies adaptées en prenant en compte leurs capacités spécifiques et en mettant en place des méthodes adaptées [1, 6, 20, 46, 47].

3 PROCESSUS DE CONCEPTION

Nous avons collaboré avec un atelier de pilotage de drone existant depuis un an mené par l'association Elheva et le Fablab Articlelect. L'équipe organisatrice se compose de 4 bénévoles de la section drone du Fablab, d'une ergothérapeute et d'une psychomotricienne qui ont participé à tous les ateliers. Les thérapeutes apportent un cadre postural et cognitif adapté aux pilotes en ajoutant par exemple des supports sous les avant-bras ou en adaptant l'éclairage. Nous avons utilisé une démarche participative et itérative avec toutes les parties prenantes du projet. En effet, des études précédentes ont démontré le besoin d'impliquer des utilisateurs avec déficiences dans la conception [35, 47], mais également leur environnement familial et leurs aidants [16, 46]. La figure 1 présente le déroulement

du projet avec les rencontres, ateliers et les différents itérations de CandyFly utilisées lors des ateliers.

3.1 Participants

Plusieurs pilotes avec des déficiences différentes ont participé aux ateliers. Parmi ceux-ci, certains ont pu être interviewés et sont revenus à plusieurs reprises. La table 1 donne un descriptif détaillé des pilotes impliqués tout au long du projet. Pour les ateliers qui se sont déroulés sans notre présence (ateliers 3 et 4 sur la figure 1), nous n'avons pas pu collecter d'informations détaillées sur les participants, mais il s'agissait de 4 enfants entre 7 et 12 ans avec des déficiences cognitives ou motrices. Pour l'atelier 5, les organisateurs ont filmé et photographié la séance et nous ont fait des retours écrits et oraux. Les participants étaient choisis par les organisateurs de l'atelier sur la base de leurs disponibilités mais aussi de leur capacités cognitives et motrices afin de pouvoir explorer l'apport de cette activité pour différents types de déficiences. L'atelier de pilotage avait pour but principal d'être une activité ludique pour les participants, mais s'inscrivait aussi dans leur parcours thérapeutique.

3.2 Observations et entretiens

Nous avons démarré notre collaboration par une séance d'observation d'un atelier d'une demi-journée avec les participants P1, P2, P3, P4 et P5. Nous avons également mené des entretiens avec les participants et leurs aidants pour recueillir leurs avis, besoins et difficultés lors du pilotage. Les drones utilisés étaient des petits drones JJRC H63 modifiés pour pouvoir être pilotés avec une radio-télécommande utilisée dans l'aéro-modélisme. La collaboration entre Elheva et Articlelect autour d'ateliers de drone existait depuis un an environ. Cela nous a permis d'observer les adaptations existantes proposées par les organisateurs et d'identifier les besoins mais également de dégager des pistes pour la conception d'interactions.

3.3 Conception itérative

Nous avons ensuite réalisé trois itérations de prototypes qui ont été utilisées lors d'ateliers de pilotage. À partir de la deuxième itération, le prototype a été laissé avec de la documentation pour réaliser d'autres ateliers en autonomie. Dans ces itérations, les organisateurs ont préparé et configuré le matériel. Notre approche peut être comparée à l'utilisation d'une sonde technologique [21] car nous souhaitons évaluer la technologie en contexte réel d'utilisation, mieux comprendre les besoins et inspirer de nouvelles idées pour aider le pilotage de drone. Entre chaque itération, nous avons rencontré les organisateurs de l'atelier pour faire des bilans de nos prototypes, recueillir leurs retours et discuter des perspectives possibles. Les thérapeutes ont également participé à la conception en apportant leur expertise et suggestions lors de chaque itération. Les entretiens et discussions ont été transcrits et nous avons filmé et photographié les ateliers avec le consentement des participants et de leurs familles.

4 CONTEXTE ET EXIGENCES

Pour améliorer le confort et les performances des participants, les organisateurs et les thérapeutes avaient déjà réalisé des adaptations

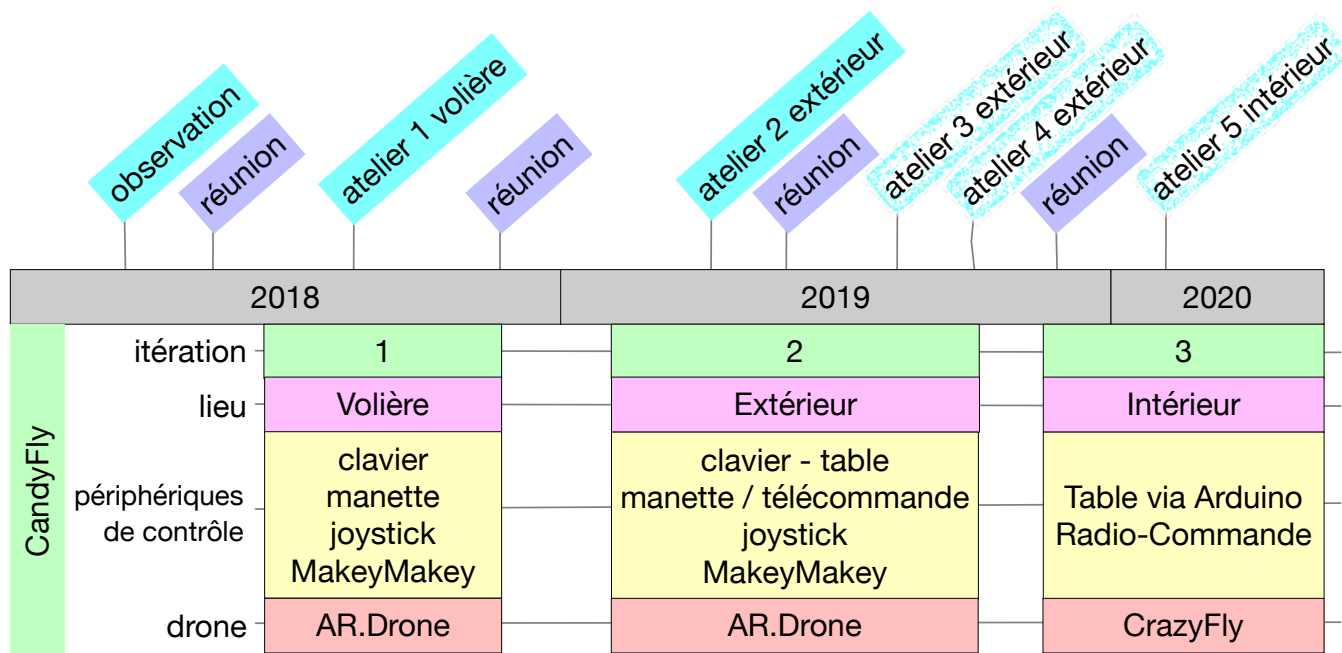


FIGURE 1: Présentation chronologique des étapes de notre approche de conception et des itérations de CandyFly. Pour chaque itération, le lieu de vol, les périphériques de contrôle et le ou les drones utilisés sont détaillés. Les ateliers 3, 4 et 5 ont été réalisés en autonomie par les organisateurs.

ID	Genre	Age	Description	Ateliers
P1	F	14	déficiences motrices et cognitives de naissance, ainsi que des troubles d'attention et de parole.	1 2 3
P2	H	23	déficiences cognitives de naissance. Il a une durée d'attention limitée et ne possède pas de perception visuelle en profondeur.	1
P3	H	20	légères déficiences cognitives de naissance et limitations motrices au niveau des mains.	1 2 3 5
P4	H	45	déficiences cognitives et motrices à la suite d'un accident.	1 2 3 5
P5	F	4	déficiences cognitives et motrices de naissance.	1
P6	F	19	déficiences motrices du bas de corps et légères déficiences cognitives.	5

TABLE 1: Participants impliqués dans les différents ateliers de pilotage. L’âge des participants est leur âge au début de l’atelier.

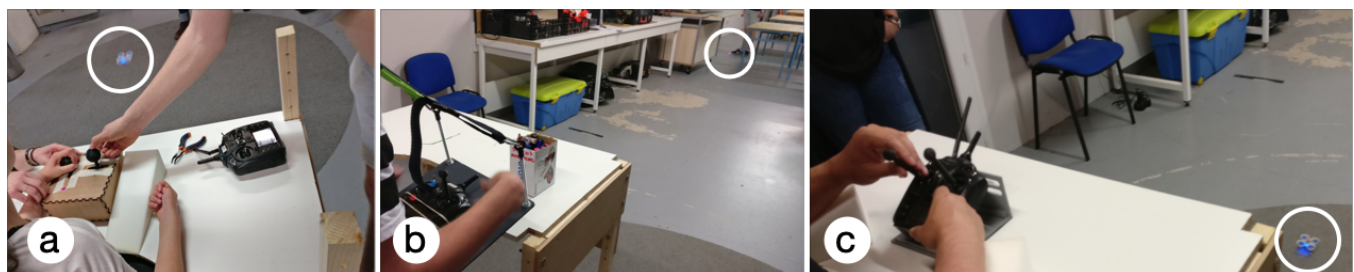


FIGURE 2: Participants pilotant les drones lors d'un atelier, les drones sont entourés par des cercles blancs. a) P1 avec la table adaptable et la boîte en bois pour cacher et diriger la manette; b) P3 avec la manette posée sur la tablette fixée aux épaules; c) P4 avec la manette posée sur un support incliné et des mousses pour soutenir les avant-bras.

matérielles et contextuelles. Par exemple, une table réglable en hauteur, des cales pour les avant-bras ou des joysticks de différentes

tailles pour les télécommandes (voir Figure 2) ont été fabriquées spécifiquement. Pour chaque participant, les configurations de matériel devaient être mémorisées pour être réutilisées aux ateliers suivants

(p.ex. notées sur une feuille). L'objectif principal de l'atelier était le pilotage de drone. Nous avons observé que tous les participants, sauf P3, ont eu du mal à piloter le drone pendant plus de quelques secondes et l'ont régulièrement fait percuter les murs, le plafond ou l'ont perdu sous un meuble. Ceci est principalement dû aux difficultés à stabiliser le drone verticalement ainsi qu'à la forte demande en compétences cognitives et motrices pour contrôler le déplacement précis. P3 qui est un joueur de jeu vidéo expérimenté, ce qui lui apporte ces compétences, a réussi le pilotage sur des durées de quelques minutes. Nos observations concernent la cognition et perception et les capacités motrices.

Cognition et perception : Un espace calme a été choisi pour l'atelier pour éviter les distractions et pour faciliter l'attention. Ceci est d'autant plus important que certains des participants présentent des troubles d'attention. Pour P1, tous les participants devaient se cacher en dehors de son champs de vision pour ne pas la distraire.

Un challenge rencontré par l'ensemble des participants concerne la conduite d'un drone en 3D avec un lacet (rotation autour de son propre axe vertical) qui oblige à adopter une orientation égocentrique et inversée sur le drone. Ceci a causé de nombreuses chutes et collisions du drone. De même, lors de déplacements trop rapides du drone, certains participants l'ont perdu de vue et n'ont plus pu le contrôler.

Comprendre les directions était un défi pour P1. Pour l'aider, un autre participant était placé devant elle, à l'intérieur de l'espace de vol, tout en portant des autocollants de couleur sur son corps qui correspondaient aux autocollants de couleur de la télécommande. A cause de sa perception en 2D (pas de profondeur), P2 avait du mal à piloter lui-même. Il portait des lunettes de réalité virtuelle avec vue à la première personne pendant qu'un compagnon pilotait à sa place. Il avait besoin d'explications au début de chaque session pour se rappeler comment le système fonctionne.

P1 et P4 utilisaient une boîte en bois (voir figure 2 a) qui dissimulait la complexité de la télécommande et limitait les portées des manettes de jeu : déplacement vertical et horizontal seulement avec une ouverture en forme de croix.

Capacités motrices : Une table a été fabriquée pour P1 et P4 qui peut être ajustée à la hauteur de leur fauteuil roulant pour soutenir une position confortable de leurs bras avec des morceaux de mousse (voir figure 2). Un support permet de maintenir la télécommande dans une position agréable. P3 a utilisé une tablette faite sur mesure et accrochée à ses épaules pour mettre la télécommande et prévenir la fatigue du poignet (figure 2 b).

Tous les participants ont utilisé la manette avec des bâtons plus longs et/ou avec des embouts plus grands qui ont été imprimés en 3D pour une meilleure prise en main. Nous avons observé que certains participants font des mouvements moteurs petits mais précis alors que d'autres font des mouvements plus grands, forts et imprécis.

4.1 Exigences identifiées

En se basant sur l'observation de cet atelier, les interviews et des discussions avec les organisateurs de l'atelier, nous formulons des exigences pour la conception d'interactions pour le pilotage de drones :

Favoriser l'aspect ludique (FUN). Les pilotes peuvent s'amuser à piloter en modulant le niveau de difficulté afin qu'il soit suffisant mais pas excessif. Les pilotes peuvent également progresser dans le temps et développer des compétences.

Faciliter la concentration des pilotes (CONCENTRATION). Les pilotes avec des capacités d'attention limitées doivent pouvoir se concentrer sur le pilotage. Il faut minimiser les distractions.

Garantir la sécurité des pilotes, des aidants et du matériel (SÉCURITÉ). Il s'agit de réduire les risques en l'air et au sol pouvant se produire lors d'une panne technique ou d'une erreur de pilotage.

Adapter le domaine de vol aux capacités perceptives (PERCEPTION). Il faut éviter les situations où le drone sort du champs de vision du pilote à cause de sa position (e.g. derrière la personne) ou de sa vitesse de déplacement.

Adapter les périphériques et les interactions aux capacités motrices (MOTRICITÉ). Les pilotes doivent pouvoir piloter confortablement avec des mouvements qu'ils sont capables de faire sans douleurs. Les interactions doivent pouvoir être ajustées à la force et aux amplitudes de mouvement des pilotes.

Faciliter ou automatiser la stabilisation du drone (STABILISATION). Les pilotes doivent être soutenus lors des phases de vol délicates comme le décollage ou l'atterrissage. Si aucune commande n'est touchée, le drone doit pouvoir rester en vol stationnaire sans ajustement continu.

Maintenir une relation de causalité entre commandes et comportement du drone (CAUSALITÉ). Les pilotes doivent se sentir en contrôle du drone pour apprécier l'activité. Il faut par exemple minimiser la latence entre la commande effectuée et la réaction du drone.

Limiter la complexité des commandes et des mouvements (COMPLEXITÉ). Les pilotes doivent pouvoir utiliser des commandes simplifiées et indépendantes des autres (contrairement aux joysticks qui contrôlent deux dimensions en parallèle). Certains mouvements causant des difficultés comme le changement d'orientation du drone doivent pouvoir être limités.

5 CONCEPTION ITÉRATIVE DE CANDYFLY, UNE APPLICATION ADAPTÉE ET ADAPTABLE

Pour répondre aux besoins des pilotes et explorer des solutions aux exigences formulées, nous avons conçu CandyFly, une application qui peut adapter le degré de contrôle aux capacités des utilisateurs en tirant parti des pilotes automatiques des drones et des différentes périphériques d'entrée. Dans cette section, nous présentons d'abord les trois itérations de CandyFly visibles sur la figure 3 en présentant les approches choisies pour adapter les interactions aux capacités des pilotes et répondre aux besoins de leurs compagnons. Nous décrivons ensuite les résultats de quatre ateliers (1, 2, 4 et 5) lors desquels nous avons pu recueillir des retours des participants ou des organisateurs.

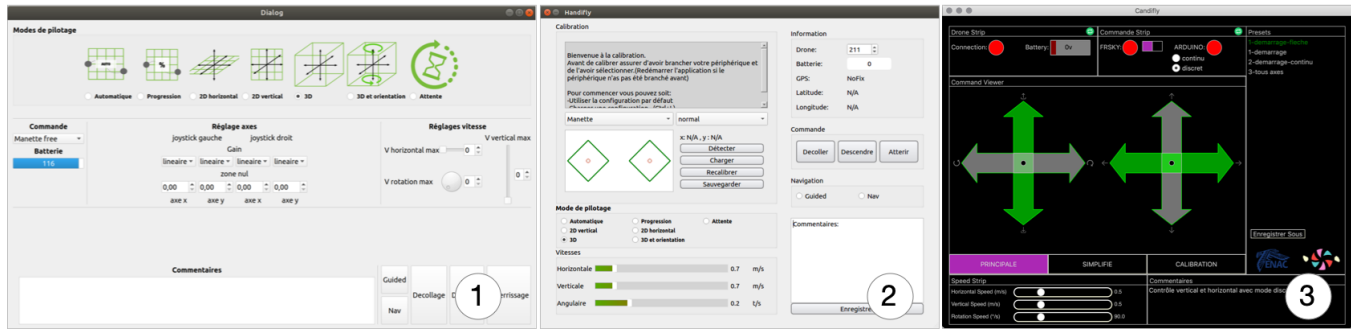


FIGURE 3:   volution de l'interface graphique de CandyFly (de gauche à droite) : itération 1, itération 2, itération 3

5.1 CandyFly

CandyFly est une application qui permet de piloter les drones avec différents périphériques, de superviser le vol par un pilote de sécurité si besoin et d'adapter au mieux le système aux besoins des utilisateurs via une interface graphique. La figure 4 illustre cet ensemble pour la seconde itération de CandyFly. En fonction des itérations, l'application permet d'utiliser différents périphériques d'entrée et différents drones. Ces différences sont illustrées sur la figure 1. Toutes les versions de CandyFly ont été réalisées en Python en utilisant la librairie Qt5 pour l'interface graphique.

5.1.1 Types de drones utilisables et pilote de sécurité.

Les deux premières itérations de CandyFly utilisent Paparazzi UAV, un projet open-source de logiciel et de matériel pour les drones [14, 19]. CandyFly s'interface avec Paparazzi en échangeant des messages sur un bus Ivy [8]. Ceci permet d'utiliser un autopilote dans le drone, de connaître la position du drone dans l'espace, la charge de sa batterie mais également de lui envoyer des instructions pour le faire voler. Pour ces itérations (figure 1), nous avons utilisé des AR.Drone 2 de Parrot ⁴ soit dans une volière équipée d'un système de positionnement externe Optitrack (itération 1) soit en extérieur avec le capteur GPS (itération 2). Pour la troisième itération, nous avons choisi d'utiliser des petits drones CrazyFlie de BitCraze ⁵ capables de voler en intérieur. Nous utilisons la librairie Python fournie par BitCraze afin de contrôler le drone en utilisant les algorithmes de stabilisation fournis. Nous utilisons également les capteurs de proximité intégrés au drone pour réduire la vitesse lorsque le drone se rapproche d'un obstacle afin d'éviter les collisions. Pour les deux premières itérations, un pilote de sécurité doit être présent pour assurer la reprise en main du drone en cas de risque. C'est également le pilote de sécurité qui allume et éteint les moteurs du drone. Pour la troisième itération le pilote de sécurité est optionnel car les risques sont moindres avec la taille réduite des drones. La première itération 1 est décrite en détail dans [15].

5.1.2 Interactions adaptables aux capacités des utilisateurs.

Nous présentons les adaptations réalisées selon trois axes : le matériel, le logiciel et l'automatisation.

Au niveau du matériel utilisé, CandyFly permet aux pilotes de choisir parmi plusieurs types de contrôleurs comme des radio-commandes, de manettes de jeux vidéo, le clavier de l'ordinateur

ou un makey makey [12] (une plateforme permettant d'utiliser des objets comme des touches du clavier), pour s'adapter aux capacités physiques de l'utilisateur (itérations 1 et 2). Les pilotes peuvent également contrôler les déplacements du drone avec des touches tactiles (itération 2) ou sensibles à la pression (itération 3) intégrées dans une table en bois conçue et fabriquée par les organisateurs (voir figure 8) ou un prototype en carton (voir figure 5). Des capteurs capacitifs ou de pression sous les touches transmettent les valeurs via un Arduino⁶ relié à l'application par USB. Pour la troisième itération, les pilotes peuvent contrôler les mouvements de façon continue ou discrète. Dans le cas continu, plus la pression est importante plus la consigne de vitesse donnée au drone est importante. Dans le cas discret, les touches fonctionnent comme des boutons, c'est à dire que la commande n'est effectuée que lorsque le bouton est relâché.

Au niveau logiciel, nous proposons plusieurs approches pour le réglage fin du mapping, c'est-à-dire la mise en correspondance des entrées sur les périphériques avec les commandes envoyées au drone. La vitesse maximale de mouvement vertical, horizontal et de rotation du drone peut être ajustée à l'aide de curseurs et de boîtes à nombre (toutes itérations). La sensibilité des dispositifs d'entrée peut être réglée individuellement pour chaque axe des manettes (itération 1), calibrée de façon interactive (itération 2) ou ajustée avec des curseurs d'étendue ou range sliders (itération 3). Pour la calibration interactive, les pilotes doivent tout d'abord rester dans une position de repos confortable pour calibrer le zéro de chaque axe puis bouger au maximum sur chaque axe pour affecter les valeurs maximales et définir le changement d'échelle sur chaque axe. Les curseurs d'étendue, visibles sur la figure 5 c sont utilisés avec des touches sensibles à la pression et permettent de définir le seuil de pression minimal et maximal pour chaque touche. L'application fournit un retour visuel direct de la commande ce qui permet d'ajuster la calibration.

Au niveau de l'automatisation, nous proposons plusieurs modes de pilotage avec différents niveaux d'assistance qui constituent un continuum allant du contrôle entièrement automatique au contrôle manuel, permettant ainsi une progression dans la difficulté des tâches de pilotage. La première itération permet de choisir un mode parmi plusieurs prédéfinis dont un mode où le lacet est d  activ   ou un mode complètement automatique qui permet aux pilotes d'appréhender un mouvement possible du drone dans l'espace. Il y

⁴<https://www.parrot.com/fr>

⁵<https://www.bitcraze.io/products/crazyflie-2-1/>

⁶<https://www.arduino.cc/>

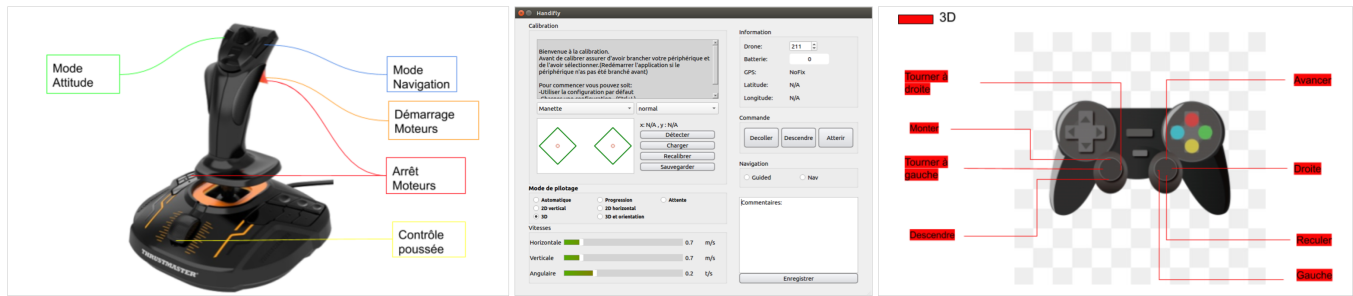


FIGURE 4: Extrait du manuel fourni à l'atelier pour la Seconde itération de CandyFly. A gauche, commandes pour le pilote de sécurité, au centre l'interface graphique, à droite, les commandes sur une manette.

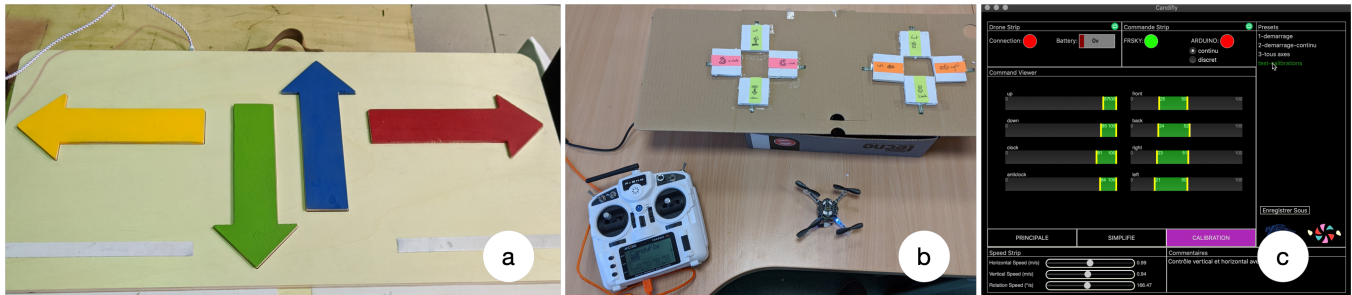


FIGURE 5: Troisième itération de CandyFly. a) table en bois avec les touches en forme de flèches colorées. b) la radio-commande, le prototype en carton de touches sensibles et le drone. c) affichage de la calibration avec des curseurs d'étendu pour chaque touche.

a également un mode prédéfini où le drone suit un plan de vol déterminé quelle que soit la commande utilisée par les pilotes. Lorsque la commande est relâchée, le drone s'arrête. Pour les itérations suivantes, nous avons décidé de passer de modes distincts à la possibilité d'activer ou de désactiver un axe de pilotage comme l'axe avant/arrière, ou l'axe haut/bas par exemple. Les pilotes ou les accompagnants peuvent sélectionner les axes directement sur les flèches les représentant dans l'interface graphique (voir figure 3). Enfin, pour faciliter certaines phases de vol, nous avons mis en place la possibilité de décoller et d'atterrir avec un bouton sur l'interface graphique.

5.1.3 Interactions pour faciliter le déroulements des ateliers.

CandyFly dispose d'interactions dédiées à faciliter la mise en oeuvre et le déroulement d'ateliers. Par exemple, l'interface graphique affiche l'état de la batterie avec des niveaux de couleur indiquant lorsqu'il faut la changer. Afin de garder une trace écrite de tout détail pertinent comme "P1 a mieux réussi avec les gros joysticks", il est possible de prendre des notes dans un champs de texte. A partir de la troisième itération, les réglages effectués dans l'application et les notes textuelles peuvent être enregistrés et réutilisés lors de sessions ultérieures.

En synthèse, la première itération nous a permis de mettre à disposition des pilotes et de leurs aidants les fonctionnalités de CandyFly. pour la seconde, nous avons mis en avant les fonctionnalités principales et introduit l'utilisation d'axes activables au lieu de modes. Enfin, la troisième itération a été conçue pour améliorer

l'accès aux fonctionnalités importantes et limiter la distraction dû à la lumière avec un style graphique sombre.

5.2 Résultats des ateliers de pilotage

Les ateliers de pilotage nous ont permis d'observer les pilotes utilisant les différentes itérations de CandyFly. Les pilotes et leurs aidants nous ont fait de nombreux retours pour améliorer l'application et s'adapter à leurs capacités. L'ensemble des participants et des organisateurs ont également suggéré de nouvelles pistes à explorer.

Tout d'abord, les participants ont pu faire voler les drones la majeure partie du temps (ateliers 1, 2 et 5) et moins de chutes se sont produites, que ce soit en volière, en extérieur ou en intérieur. Cela présente une nette amélioration par rapport à l'atelier que nous avons observé initialement et a été gratifiant pour les pilotes, leurs accompagnateurs et les organisateurs. Lors de l'atelier 3, CandyFly n'a pas pu être utilisé à cause d'une remise à zéro du drone supprimant notre auto-pilote. Ceci a conduit les organisateurs à réutiliser leurs drones précédents sans stabilisation. Pour l'atelier 4, la table avec touches capacitatives était trop sensible pour que les participants puissent piloter. En utilisant les radio-commandes les pilotes ont pu s'amuser en faisant voler les drones en extérieur comme lors du deuxième atelier.

Les pilotes, leurs aidants et les thérapeutes ont été très positifs sur les possibilités offertes par CandyFly malgré quelques difficultés techniques. Ils ont exprimé leur plaisir à de multiples reprises et ont

souhaité revenir pour piloter à nouveau et essayer les modifications qu'ils suggéraient lors de sessions futures.

5.2.1 Poste de pilotage.

La table adaptable conçue et fabriquée par les organisateurs a été particulièrement appréciée et a été utilisée par tous les participants, même ceux avec des fauteuils roulants imposants. Pour les deux premiers ateliers, la réutilisation des joysticks allongés sur la radio-commande a permis aux participants de retrouver leurs repères tout en bénéficiant de la stabilisation de l'auto-pilote (P3, P4). Grâce aux ajustements de posture et de disposition des périphériques de contrôle réalisés par les thérapeutes, les participants ont tous exprimé leur satisfaction et n'ont pas ressenti de gêne lors de l'activité. Pour les touches sensibles à la pression utilisées lors de l'atelier 5, les guides des mains, visibles sur la figure 8 ont permis aux participants de bien comprendre la position de repos attendue (P4, P5, P6). Ceci n'était pas le cas lors des prototypes réalisés avec les touches tactiles ou les boules de pâte à modeler reliées au makey makey [12] (figures 6 et 7).

5.2.2 Sécurité des ateliers.

La sécurité des participants était une contrainte forte pour les organisateurs. L'utilisation de la volière (atelier 1) et de drones captifs, c'est à dire attachés à un support, en extérieur (atelier 2) a permis d'éviter tout dommage aux personnes. Quelques légers incidents se sont produits, plusieurs hélices cassées et un moteur abîmé. Lors de l'utilisation des petits drones BitCraze le comportement des drones a parfois été incohérent à cause d'hélices tordues ou d'une mauvaise fixation de la batterie. Notre algorithme d'anti-collision limitant la vitesse lorsqu'un obstacle est proche du drone a permis d'éviter plusieurs chocs au plafond mais n'a pas pu empêcher certains chocs latéraux sur les meubles.

5.2.3 Différentes configurations de pilotage.

Lors des ateliers, les participants ont pu essayer plusieurs types de contrôleurs et de degrés de liberté en fonction de leurs souhaits, leurs capacités et de nos suggestions. P3 a utilisé un contrôleur de jeu vidéo (atelier 1) et n'avait pas besoin de la tablette de support (figure 6). Il a ensuite utilisé la radio-commande (atelier 2) avec des joysticks agrandis (figure 7). La table avec les touches sensibles à la pression, même avec un contrôle continu (atelier 5), a été rapidement trop simple pour lui et il a préféré s'entraîner avec des drones sans automatisation.

P4 a utilisé la télécommande avec des joysticks adaptés lors des ateliers 1 et 2. L'utilisation indépendante des deux joysticks lui posait des problèmes, car il utilisait souvent ses deux mains en parallèle. Nous avons donc désactivé certains degrés de liberté comme le lacet et la profondeur. Nous avons ensuite calibré le gain de mouvement manuellement (atelier 1) puis de façon interactive (atelier 2) pour définir sa position de repos et les valeurs maximales qu'il pouvait atteindre sur chaque axe. Ceci nous a permis d'adapter CandyFly à ses mouvements, petits mais précis. Avec ce réglage, P4 a atteint un meilleur niveau de contrôle et a même pu faire voler le drone en mode 3D (sans lacet) lors des ateliers 1 et 2. Comme il était capable de faire le lien entre ses actions et leurs résultats, les thérapeutes nous ont demandé de limiter l'utilisation de l'automatisation afin qu'il puisse améliorer ses compétences motrices.

P1 a testé la commande du drone avec l'interface makey makey [12] avec des touches aluminium puis de la pâte à modeler (figures 6 et 7). Nous avons caché le makey makey et les fils pour simplifier au maximum l'interface. Lors de l'atelier 1, P1 a pu faire voler le drone plus longtemps que lors de l'atelier que nous avons observé, et s'est réjoui de ce succès. Cependant, il était difficile pour P1 de regarder le drone et la commande en même temps. Les thérapeutes ont suggérés que le makey makey manquait de retour tactile qui permettrait un pilotage non visuel. L'utilisation de la pâte à modeler a amélioré le pilotage lors du deuxième atelier mais P1 avait toujours du mal à enlever sa main de la commande après avoir appuyé. L'utilisation de la table avec touches sensibles à la pression a été conçue pour résoudre ce problème rencontré également avec d'autres participants. Malheureusement, P1 n'a pas pu essayer la version finale (atelier 5) mais seulement des prototypes lors de l'atelier 4.

P6 a pu piloter grâce à cette version comme présenté sur la figure 8 lors de l'atelier 5. Elle a eu besoin de deux ou trois tentatives afin de déterminer la force nécessaire pour déclencher un mouvement du drone en utilisant le mode discret puis a pu piloter pendant plusieurs minutes en essayant des déplacements du drone de plus en plus allongés.

Les participants et les thérapeutes ont apprécié la possibilité de changer rapidement de dispositif d'entrée ou de modifier les réglages pour affiner le contrôle à leurs capacités motrices.

5.2.4 Ajustement des degrés de libertés.

Les modes disponibles lors du premier atelier ont été appréciés par les participants. P1 a utilisé le mode complètement automatique et le mode de déplacement sur une trajectoire prédéfinie pour commencer mais a tout de suite voulu déplacer le drone verticalement et horizontalement. P3 et P4 ont utilisés le système dans tous les modes, y compris celui avec l'orientation du drone et ont pu réaliser des tâches complexes comme se poser sur un petit carton comme illustré sur la figure 6. Pour tous sauf P3, le lacet a été désactivé pour empêcher le drone de tourner sur lui même et provoquer une inversion des commandes. Pour P3 nous avons progressivement augmenté les vitesses maximales du drone (atelier 2) afin qu'il ressente un challenge lors du pilotage. Du point de vue des aidants et des organisateurs, les modes ont été perçus comme un peu trop contraignants et pas nécessairement pertinents pour adapter le pilotage aux pilotes. Nous avons donc proposé une vue par axes, réalisée pour les itérations 2 et 3 permettant d'activer ou de désactiver les commandes sur un axe particulier (voir figure 3). Cette utilisation qui se rapproche des boîtiers en bois contenant les radio-commandes réalisés antérieurement (figure 2) a été jugée adaptée et flexible par les organisateurs.

5.2.5 Sensation de contrôle.

Pour apprécier l'activité, les pilotes ont mentionné un besoin de contrôle des mouvements du drone. Par exemple, le mode automatique n'a pas été bien reçu par les participants qui souhaitaient piloter le drone au moins sur deux axes, et surtout en hauteur. Pour les participants avec des déficiences cognitives, les thérapeutes nous ont expliquées que la relation de cause à effet entre les commandes et la réaction du drone devait être rapide et très forte à plusieurs niveaux. Au niveau temporel, il faut minimiser le temps entre l'exécution d'une commande et son effet. Par exemple, lors



FIGURE 6: Atelier 1 réalisé dans une volière avec la première itération de CandyFly. a) P1 utilise des flèches directionnelles avec zones tactiles via le makey makey [12]; b) P3 pilote avec la manette de jeu vidéo; c) P4 utilise la radio-commande avec des sticks allongés.

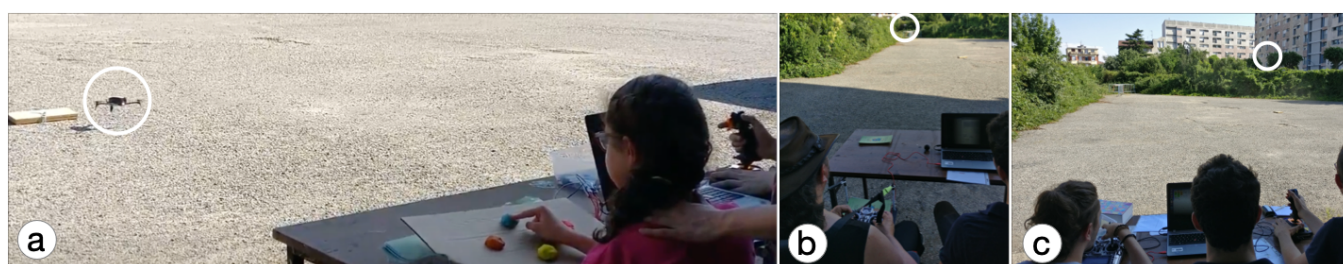


FIGURE 7: Atelier 2 à l'extérieur avec la deuxième itération de CandyFly (drones entourés en blanc). a) P1 utilise des flèches directionnelles avec des boules de pâte à modeler via le makey makey [12]; b) P4 pilote avec la radio-commande dont les positions de repos et les gains ont été ajustés; c) P3 utilise la radio-commande avec des sticks allongés (le joystick à droite est utilisé par le pilote de sécurité).



FIGURE 8: Atelier 5 réalisé à l'intérieur avec le troisième prototype. a) P6, pilotant le drone avec les flèches tactiles par appuis; b) ajustement de la table au fauteuil de P6; c) P3 utilisant les flèches tactiles avec un contrôle en pression.

du deuxième atelier, nous avons utilisé un contrôle du drone en position, c'est-à-dire que la commande incrémentait la position de la cible à atteindre par le drone. Comme le drone était captif, il y a eu des situations pour P3 et P4 où la consigne était relativement éloignée car ils ont dépassé la zone de vol et il fallait maintenir le joystick dans la direction opposée pendant quelques secondes avant que le drone change de direction. Ceci a été source de frustration et ils ont tous les deux souhaités que nous changions ce comportement. Ce phénomène a été évité en utilisant un contrôle en vitesse qui réagit rapidement à la consigne demandé.

A un autre niveau, l'utilisation de la table avec les touches capacitives conduisait à quelques détections de contact lorsque la

main passait à proximité du capteur et donc au mouvement du drone. Cette relation de cause à effet n'a pas été comprise et les pilotes (P1, P4) nous ont signifiés qu'ils ne souhaitaient pas utiliser cette interface si le comportement était imprévisible. Le prototype utilisant des capteurs de pression a permis de lever cette limitation et à été particulièrement apprécié par P4 et P6.

Enfin, nous avons proposé une interaction utilisant l'énergie des participants pour faire monter un drone en secouant un objet ou en le faisant tourner. Les thérapeutes ont refusé pour les déficiences cognitives car l'association de la direction du geste dans l'espace devait correspondre à la direction du drone sous peine de perte de lien de cause à effet.

5.2.6 *Prise de note et réutilisation des réglages.*

Lors du premier atelier, les participants nous ont expliqué que la sauvegarde de tous les réglages ainsi que des commentaires sur l'interface graphique serait un ajout très précieux pour encourager la réutilisation. A partir de la deuxième itération, nous avons créé ensemble des réglages pour P4 et P5 ainsi que des pré-réglages basiques pour s'adapter à différents types de participants. Ces pré-réglages ont notamment été utilisés lors de l'atelier 5 pour adapter le réglage de P3    P6. Concernant les commentaires, nous n'avons pas observé de réel usage du champs de texte hormis la description des réglages.

5.2.7 *Synthèse.*

CandyFly nous a permis de proposer des interactions adapt   es aux capacités des participants qui ont pris du plaisir à piloter des drones en extérieur et en intérieur. L'utilisation de drones du commerce utilisés par des pilotes sans déficiences a également ajouté aux retours positifs des participants. Nous avons tiré parti de différents dispositifs d'entrée (makey makey [12], manette de jeu, télécommande standard, tables avec touches sensibles à la pression) pour chaque participant et les avons réglés avec des plages et des gains logiciels afin de maximiser le contrôle. L'automatisation intégrée dans les modes de pilotage a permis aux participants d'éviter des plantages incessants tout en maintenant un niveau de difficulté suffisant pour qu'ils puissent apprécier l'activité.

6 AXES D'ADAPTATION ET DISCUSSION

En concevant CandyFly et en l'utilisant lors d'ateliers avec des pilotes avec des déficiences, nous avons identifié des exigences (voir 4.1) et plusieurs axes d'adaptation : matériel, logiciel et automatisation. Lors des phases de conception, ces axes nous ont aidés à répondre aux besoins des utilisateurs. Nous présentons ces axes en nous basant sur CandyFly mais en les généralisant pour les rendre utiles aux concepteurs de systèmes similaires.

6.1 Adaptations matérielles

Nos prototypes mettent en avant la nécessité de flexibilité en termes de contrôleurs physiques afin de s'adapter aux capacités motrices divers des utilisateurs (MOTRICITÉ). En effet, les télécommandes existantes peuvent être complexes et distraire les pilotes (CONCENTRATION) ou ne pas être adaptées à leurs postures et à leurs possibilités de mouvement (MOTRICITÉ). Nous proposons d'utiliser une variété de contrôleurs, y compris des contrôleurs de jeu, des claviers logiciels ou des makey makey [12] qui permettent de cr   er des interfaces innovantes facilement reconfigurables, par exemple en changeant la position ou la forme des contrôles. Les manettes de jeux vidéo adaptatives de Microsoft Xbox [29] sont de bons exemples de ce type de matériel spécialisé.

Un soutien physique peut être nécessaire avec l'utilisation de supports en mousse posés sous les avants bras des participants ou des tablettes réglables comme proposées par les organisateurs pour P1, P3, P4, P5 et P6 (MOTRICITÉ). L'utilisation de joysticks plus allongés que sur les radio-commandes du commerce a aussi permis d'améliorer les performances des pilotes (P3-P4) et leur satisfaction (MOTRICITÉ).

Fournir aux pilotes des indications cohérentes entre le drone, les télécommandes et l'espace doit être pris en compte (CAUSALITÉ).

Des associations de couleurs entre le contrôleur physique et l'espace peuvent être souhaitables (comme pour P1 lors de l'observation). Il faut aussi veiller à maintenir une réponse rapide du système pour que le lien de cause à effet soit compris.

Enfin, concernant la SÉCURITÉ, nous avons utilisé une volière et des drones captifs pour éviter les chocs mais cela a parfois déconcentré P1 et P4 (CONCENTRATION). L'utilisation de drones avec des protections autour des hélices en intérieur ou des contraintes sur la zone de vol intégrées à l'auto-pilote sont des pistes à explorer.

6.2 Adaptations Logicielles

Chaque participant ayant des amplitudes de mouvement et des précisions très différentes (P1-P3-P4-P5), il faut fournir des outils permettant de calibrer et d'ajuster les interactions à la force et à la précision des pilotes. Pour certains, la position de repos n'est pas nécessairement la position centrale du joystick car cela dépend des supports utilisés (P3). Pour ces situations, nous suggérons de permettre une adaptation au niveau logiciel (MOTRICITÉ). Par exemple, le logiciel peut régler la position zéro d'un joystick sur la position de repos d'un utilisateur ou augmenter le gain pour permettre des mouvements très précis avec de faibles amplitudes. D'autres adaptations possibles comprennent l'utilisation d'une fonction de filtrage pour minimiser les tremblements indésirables de l'entrée tels que les secousses de la main.

Pour garantir la perception du drone et de ses déplacements, nous avons limité certains degrés de liberté comme le déplacement en profondeur ou le lacet (PERCEPTION, COMPLEXITÉ). Il pourrait être souhaitable de limiter le domaine de vol du drone afin que celui-ci reste dans le champs de vision des pilotes avec un suivi de leur regard ou une connaissance à priori de leur champs de vision. Le choix de vitesses faibles au début a permis à P1, P4 et P6 de ne pas perdre le drone de vue lors de déplacements trop rapides ou lorsque le drone change d'orientation pour P1 (PERCEPTION, CONCENTRATION). L'augmentation progressive de la vitesse du drone a été une source importante de plaisir pour les pilotes (FUN).

6.3 Adaptations via l'automatisation

Stabiliser un drone en l'air est une tâche particulièrement complexe car cela nécessite d'ajuster de façon continue la poussée des moteurs et l'inclinaison du drone. Le besoin de faciliter la stabilisation et certaines phases de vols délicates comme le décollage ou l'atterrissage a été mis en avant par les pilotes et les organisateurs de l'atelier. Nous proposons de faciliter certaines tâches complexes en les automatisant (STABILISATION, COMPLEXITÉ). Cette automatisation a permis aux pilotes de faire voler les drones beaucoup plus longtemps et sans incidents, ce qui a été une source de fierté (FUN). Pour P3 qui avait le plus de capacités, ces automatismes lui ont permis de progresser afin de mieux piloter un système existant sans automatisation. Même si pour les personnes ayant des déficiences cognitives importantes, l'utilisation d'un plan de vol prédéfini peut les aider à comprendre progressivement le mouvement du drone et à le localiser dans l'espace, cela n'a pas été apprécié par les pilotes (CONTRÔLE). L'utilisation d'automatismes progressivement débrayables comme les degrés de liberté de mouvements sont plus appropriés à respecter l'aspect ludique de l'activité (FUN).

6.4 Discussion et perspectives

En combinant ces trois axes (logiciel, matériel et automatisation) dans CandyFly, nous avons réussi à accroître le plaisir de piloter en fournissant des interactions adaptées et adaptables. Ces fonctionnalités sont accessibles et ajustables par les utilisateurs et leurs compagnons ce qui permet une grande souplesse d'utilisation pour prendre en charge plusieurs déficiences. Cependant, le faible nombre de participants aux ateliers n'a pas permis d'explorer CandyFly pour toutes les types de déficiences (p.ex. déficience visuelle) et il est prévu d'organiser d'autres ateliers à l'avenir. Nous envisageons également de tester ces interfaces avec des enfants. En outre, il reste difficile pour les aidants de décider d'une configuration souhaitable pour un nouveau participant. Les thérapeutes ont produit un guide sous forme de questions visant à caractériser les déficiences des pilotes que nous avons utilisé au début pour proposer quelques pré-réglages. Il serait particulièrement intéressant d'intégrer ces questions dans notre application pour aider les organisateurs à identifier rapidement les réglages à utiliser sur l'application et à les faire évoluer en fonction d'objectifs de plus haut niveau comme "augmenter ou diminuer le challenge".

Nous avons fréquemment modifié les interactions de CandyFly pour maximiser leur relation de cause à effet ainsi que la sensation de contrôle des pilotes. La troisième itération avec la table et les flèches sensibles à la pression a donné une grande satisfaction aux pilotes de l'atelier 5 et les thérapeutes ont indiquées vouloir poursuivre avec cette version. Plusieurs perspectives sont considérées pour améliorer la compréhension de la causalité comme l'utilisation de retours sonores spatialisés dans la direction de la commande ou l'utilisation de lumières colorés sur le drone correspondant à la couleur de la flèche utilisée. Ainsi l'appui sur la flèche rouge permettant d'aller à droite déclencherait un son se déplaçant vers la droite et la couleur correspondante apparaîtrait sur le drone.

Tout au long du projet, nous avons mis en place une démarche de conception participative avec des utilisateurs ayant des déficiences divers et leurs thérapeutes. Comme démontré par des recherches précédentes [16, 46], il était important d'impliquer la famille et les aidants des personnes en situation de handicap pour expliciter leurs besoins, capacités et envies. Dans certains cas la communication directe avec les personnes déficientes pouvait être difficile, mais les émotions et le plaisir étaient facilement observable et leurs familles pouvaient nous confirmer ce ressenti.

Selon les aidants et les organisateurs de l'atelier, CandyFly pourrait être utilisé par d'autres pilotes et d'autres associations. Nous avons documenté et partagé le code de CandyFly ainsi que plusieurs pré-réglages sur la plateforme [github](https://github.com/jeremie-garcia/candyfly)⁷. Les plans pour fabriquer la table et le code Arduino vont également être ajoutés ainsi que des conseils sur le déroulement d'un atelier. Nous espérons ainsi que d'autres personnes, aidants, familles ou chercheurs puissent reproduire et/ou modifier CandyFly.

7 CONCLUSION

Nous avons présenté CandyFly, une application adaptée et adaptable permettant aux pilotes avec déficiences cognitives, motrices et perceptives de piloter des drones comme activité de loisir. Notre collaboration avec un atelier de pilotage existant mené par un FabLab

et une association a permis d'identifier des difficultés, de formuler des exigences pour ce type de système et d'explorer plusieurs dispositifs matériels et logiciels pour faciliter cette activité. Notre approche combinant des adaptations matérielles, logicielles et l'automatisation a permis aux pilotes de s'amuser et de progresser au fil des ateliers. Les accompagnateurs, les pilotes et leurs familles ont exprimé leur plaisir à de multiples reprises et manifesté leur volonté de poursuivre l'atelier pour progresser. Nos axes d'adaptation peuvent servir aux concepteurs d'autres systèmes d'assistance et de loisir. Enfin, ces axes d'adaptation pourraient servir à la conception de nouvelles technologies interactives pour les enfants, qui ont des capacités cognitives et motrices différentes des adultes.

Nous prévoyons de poursuivre les ateliers et d'améliorer CandyFly en intégrant des retours sonores et visuels sur le drone pour renforcer la perception de cause à effet entre les commandes et le comportement du drone. Nous souhaitons également poursuivre le travail sur les interactions permettant d'accompagner le choix de réglages comme la calibration interactive ou la proposition de challenges adaptés. Enfin, nous allons explorer les implications de ce travail pour le pilotage et l'interaction avec des systèmes automatisés dans des conditions dégradées comme la surcharge cognitive ou des problèmes de motricité et de perception.

REMERCIEMENTS

Nous remercions tous les pilotes qui ont participé à ces recherches. Nous remercions très chaleureusement Noémie, Damien, Isabelle, Jean-Michel, Florence et Rozenn ; l'association Elheva ; le Fablab Artillect ; Luc et Sid Ahmed ; ainsi que Fabien, Gautier, Michel, Yannick et Xavier de l'équipe Drone de l'ENAC pour leur aide et leur motivation. Enfin, nous remercions les relecteurs pour leurs suggestions sur cet article.

RÉFÉRENCES

- [1] Jérémy Albouys-Perrois, Jérémy Laviolle, Carine Briant, and Anke M. Brock. 2018. Towards a Multisensory Augmented Reality Map for Blind and Low Vision People : A Participatory Design Approach. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Montreal QC, Canada) (CHI '18). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–14. <https://doi.org/10.1145/3173574.3174203>
- [2] Mauro Avila Soto, Markus Funk, Matthias Hoppe, Robin Boldt, Katrin Wolf, and Niels Henze. 2017. DroneNavigator : Using Leashed and Free-Floating Quadcopters to Navigate Visually Impaired Travelers. In *Proceedings of the 19th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility - ASSETS '17*. ACM Press, New York, 300–304. <https://doi.org/10.1145/3132525.3132556>
- [3] Mehmet Aydin Baytas, Markus Funk, Sara Ljungblad, Jérémie Garcia, Joseph La Delfa, and Florian 'Floyd' Mueller. 2020. iHDI 2020 : Interdisciplinary Workshop on Human-Drone Interaction. In *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 1–8.
- [4] Michel Beaudouin-Lafon and Wendy E. Mackay. 2009. Prototyping tools and techniques. In *Human-Computer Interaction*. CRC Press, 137–160.
- [5] Cynthia L. Bennett, Kristen Shinohara, Brianna Blaser, Andrew Davidson, and Kat M. Steele. 2016. Using a Design Workshop To Explore Accessible Ideation. In *Proceedings of the 18th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility* (Reno, Nevada, USA) (ASSETS '16). ACM, New York, NY, USA, 303–304. <https://doi.org/10.1145/2982142.2982209>
- [6] Anke Brock, Jean-Luc Vinot, Bernard Oriola, Slim Kammoun, Philippe Truillet, and Christophe Jouffrais. 2010. Méthodes et Outils de Conception Participative Avec Des Utilisateurs Non-Voyants. In *Proceedings of the 22nd Conference on l'Interaction Homme-Machine* (Luxembourg, Luxembourg) (IHM '10). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 65–72. <https://doi.org/10.1145/1941007.1941017>
- [7] Anke M. Brock, Julia Chatain, Michelle Park, Tommy Fang, Martin Hachet, James A. Landay, and Jessica R. Cauchard. 2018. FlyMap : Interacting with Maps Projected from a Drone. In *Proceedings of the 7th ACM International Symposium*

⁷<https://github.com/jeremie-garcia/candyfly>

- on *Pervasive Displays - PerDis '18*. ACM Press, New York, 1–9. <https://doi.org/10.1145/3205873.3205877>
- [8] Marcellin Buisson, Alexandre Bustico, Stéphane Chatty, Francois-R  gis Colin, Yannick Jestin, Sébastien Maury, Christophe Mertz, and Philippe Truillet. 2002. Ivy : un bus logiciel au service du développement de prototypes de systèmes interactifs. In *Proceedings of the 14th Conference on l'Interaction Homme-Machine*. 223–226.
 - [9] Jessica R. Cauchard, L. E. Jane, Kevin Y. Zhai, and James A. Landay. 2015. Drone & me : an exploration into natural human-drone interaction. In *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing - UbiComp '15*. ACM Press, New York, 361–365. <https://doi.org/10.1145/2750858.2805823>
 - [10] J. R. Cauchard, A. Tamkin, C. Y. Wang, L. Vink, M. Park, T. Fang, and J. A. Landay. 2019. Drone.io : A Gestural and Visual Interface for Human-Drone Interaction. In *2019 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*. 153–162.
 - [11] Chien-Fang Chen, Kang-Ping Liu, and Neng-Hao Yu. 2015. Exploring interaction modalities for a selfie drone. In *SIGGRAPH Asia 2015 Posters on - SA '15*. ACM Press, New York, 1–2. <https://doi.org/10.1145/2820926.2820965>
 - [12] Beginner's Mind Collective and David Shaw. 2012. Makey Makey : Improvising Tangible and Nature-Based User Interfaces. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction* (Kingston, Ontario, Canada) (*TEI '12*). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 367–370. <https://doi.org/10.1145/2148131.2148219>
 - [13] Nadine Couture, Sébastien Bottecchia, Serge Chaumette, Mateo Cecconello, Josu Rekalde, and Myriam Desainte-Catherine. 2018. Using the Soundpainting Language to Fly a Swarm of Drones. Springer, Cham, 39–51. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60384-1_5
 - [14] Jérémie Garcia, Anke Brock, Nicolas Saporito, Gautier Hattenberger, Xavier Paris, Michel Gorraz, and Yannick Jestin. 2019. Designing human-drone interactions with the Paparazzi UAV System. In *1st International Workshop on Human-Drone Interaction*. Ecole Nationale de l'Aviation Civile [ENAC], Glasgow, United Kingdom. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02128390>
 - [15] Jérémie Garcia, Luc Chevrier, Yannick Jestin, and Anke M. Brock. 2019. HandiFly : Towards Interactions to Support Drone Pilots with Disabilities. In *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Glasgow, Scotland Uk) (*CHI EA '19*). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–6. <https://doi.org/10.1145/3290607.3312957>
 - [16] Marine Guffroy, Vigouroux Nadine, Christophe Kolski, Frédéric Vella, and Philippe Teutsch. 2017. From human-centered design to disabled user & ecosystem centered design in case of assistive interactive systems. *International Journal of Sociotechnology and Knowledge Development (IJSKD)* 9, 4 (2017), 28–42.
 - [17] Kim Halskov and Nicolai Brodersen Hansen. 2015. The diversity of participatory design research practice at PDC 2002-2012. *International Journal of Human-Computer Studies* 74 (2015), 81 – 92. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2014.09.003>
 - [18] John Paulin Hansen, Alexandre Alap  tite, I Scott MacKenzie, and Emilie M  llenbach. 2014. The use of gaze to control drones. In *Proceedings of the symposium on eye tracking research and applications*. 27–34.
 - [19] Gautier Hattenberger, Murat Bronz, and Michel Gorraz. 2014. Using the paparazzi UAV system for scientific research.
 - [20] Shawn Lawton Henry. 2007. *Just Ask : Integrating Accessibility Throughout Design* (second ed.). Lulu.com, Breinigsville, PA, USA, 1–177 pages. <http://www.uiaccess.com/accessucd/index.html>
 - [21] Hilary Hutchinson, Wendy Mackay, Bo Westerlund, Benjamin B. Bederson, Allison Druin, Catherine Plaisant, Michel Beaudouin-Lafon, Stéphane Conversy, Helen Evans, Heiko Hansen, Nicolas Roussel, and Bj  rn Eiderb  ck. 2003. Technology Probes : Inspiring Design for and with Families. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (Ft. Lauderdale, Florida, USA) (*CHI '03*). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 17–24. <https://doi.org/10.1145/642611.642616>
 - [22] H. Kang, H. Li, J. Zhang, X. Lu, and B. Benes. 2018. FlyCam : Multitouch Gesture Controlled Drone Gimbal Photography. *IEEE Robotics and Automation Letters* 3, 4 (2018), 3717–3724.
 - [23] John J. Kelway, Anke M. Brock, Pascal Guitton, Aur  lie Millet, and Yasushi Nakata. 2018. Improving the Academic Inclusion of a Student with Special Needs at University Bordeaux. In *Proceedings of the 20th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility* (Galway, Ireland) (*ASSETS '18*). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 52–56. <https://doi.org/10.1145/3234695.3241482>
 - [24] Si Jung Kim, Yunhwan Jeong, Sujin Park, Kihyun Ryu, and Gyuhan Oh. 2018. *A Survey of Drone use for Entertainment and AVR (Augmented and Virtual Reality)*. Springer International Publishing, Cham, 339–352. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64027-3_23
 - [25] Pascal Knierim, Steffen Maurer, Katrin Wolf, and Markus Funk. 2018. Quadcopter-Projected In-Situ Navigation Cues for Improved Location Awareness. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '18*. ACM Press, New York, 1–6. <https://doi.org/10.1145/3173574.3174007>
 - [26] Kavita Krishnaswamy and Ravi Kuber. 2012. Toward the Development of a BCI and Gestural Interface to Support Individuals with Physical Disabilities. In *Proceedings of the 14th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility* (Boulder, Colorado, USA) (*ASSETS '12*). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 229–230. <https://doi.org/10.1145/2384916.2384967>
 - [27] Mikhail Matrosov, Olga Volkova, and Dzmitry Tsetserukou. 2016. LightAir : A Novel System for Tangible Communication with Quadcopters Using Foot Gestures and Projected Image. In *ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies* (Anaheim, California) (*SIGGRAPH '16*). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 16, 2 pages. <https://doi.org/10.1145/2929464.2932429>
 - [28] Oussama Metatla, Nick Bryan-Kinns, Tony Stockman, and Fiore Martin. 2015. Designing with and for people living with visual impairments : audio-tactile mock-ups, audio diaries and participatory prototyping. *CoDesign* 11, 1 (jan 2015), 35–48. <https://doi.org/10.1080/15710882.2015.1007877>
 - [29] Microsoft. [n.d.]. Xbox Adaptive Controller. <https://www.xbox.com/fr-FR/accessories/controllers/xbox-adaptive-controller>.
 - [30] Silvia Mirri, Catia Prandi, and Paola Salomoni. 2019. Human-Drone Interaction : State of the Art, Open Issues and Challenges. In *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2019 Workshop on Mobile AirGround Edge Computing, Systems, Networks, and Applications* (Beijing, China) (*MAGESys '19*). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 43–48. <https://doi.org/10.1145/3341568.3342111>
 - [31] Jawad Nagi, Alessandro Giusti, Gianni A. Di Caro, and Luca M. Gambardella. 2014. Human Control of UAVs Using Face Pose Estimates and Hand Gestures. In *Proceedings of the 2014 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction* (Bielefeld, Germany) (*HRI '14*). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 252–253. <https://doi.org/10.1145/2559636.2559833>
 - [32] T. Naseer, J. Sturm, and D. Cremers. 2013. FollowMe : Person following and gesture recognition with a quadcopter. In *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 624–630.
 - [33] Amin Nourmohammadi, Mohammad Jafari, and Thorsten O Zander. 2018. A survey on unmanned aerial vehicle remote control using brain-computer interface. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 48, 4 (2018), 337–348.
 - [34] Kevin Pfeil, Seng Lee Koh, and Joseph LaViola. 2013. Exploring 3d Gesture Metaphors for Interaction with Unmanned Aerial Vehicles. In *Proceedings of the 2013 International Conference on Intelligent User Interfaces* (Santa Monica, California, USA) (*IUI '13*). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 257–266. <https://doi.org/10.1145/2449396.2449429>
 - [35] Betsy Phillips and Hongxin Zhao. 1993. Predictors of assistive technology abandonment. *Assistive technology : the official journal of RESNA* 5, 1 (jan 1993), 36–45. <https://doi.org/10.1080/10400435.1993.10132205>
 - [36] Catherine Plaisant, Allison Druin, Corinna Lathan, Kapil Dakhane, Kris Edwards, Jack Maxwell Vice, and Jaime Montemayor. 2000. A Storytelling Robot for Pediatric Rehabilitation. In *Proceedings of the Fourth International ACM Conference on Assistive Technologies* (Arlington, Virginia, USA) (*Assets '00*). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 50–55. <https://doi.org/10.1145/354324.354338>
 - [37] Kyle Rector, Lauren Milne, Richard E. Ladner, Batya Friedman, and Julie A. Kientz. 2015. Exploring the Opportunities and Challenges with Exercise Technologies for People Who Are Blind or Low-Vision. In *Proceedings of the 17th International ACM SIGACCESS Conference on Computers & Accessibility* (Lisbon, Portugal) (*ASSETS '15*). ACM, New York, NY, USA, 203–214. <https://doi.org/10.1145/2700648.2809846>
 - [38] Andrea Sanna, Fabrizio Lamberti, Gianluca Paravati, and Federico Manuri. 2013. A Kinect-based natural interface for quadrotor control. *Entertainment Computing* 4, 3 (2013), 179 – 186. <https://doi.org/10.1016/j.entcom.2013.01.001>
 - [39] A. Sarkar, K. A. Patel, R. K. Ganesh Ram, and G. K. Kapoor. 2016. Gesture control of drone using a motion controller. In *2016 International Conference on Industrial Informatics and Computer Systems (IIICS)*. 1–5.
 - [40] Jurgen Scheible, Markus Funk, Klen Copic Pucihar, Matjaz Kljun, Mark Lochrie, Paul Egglesstone, and Peter Skrlj. 2017. Using Drones for Art and Exergaming. *IEEE Pervasive Computing* 16, 1 (jan 2017), 48–56. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2017.4>
 - [41] David Schneider. 2015. Is US drone racing legal? Maaaybe. *IEEE Spectrum* 52, 11 (2015), 19–20.
 - [42] Matthias Seuter, Eduardo Rodriguez Macrillante, Gernot Bauer, and Christian Kray. 2018. Running with Drones : Desired Services and Control Gestures. In *Proceedings of the 30th Australian Conference on Computer-Human Interaction* (Melbourne, Australia) (*OzCHI '18*). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 384–395. <https://doi.org/10.1145/3292147.3292156>
 - [43] Kristen Shinohara and Josh Tenenber. 2007. Observing Sara : A Case Study of a Blind Person's Interactions with Technology. In *Proceedings of the 9th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility* (Tempe, Arizona, USA) (*Assets '07*). ACM, New York, NY, USA, 171–178. <https://doi.org/10.1145/1296843.1296873>
 - [44] D. Tezza and M. Andujar. 2019. The State-of-the-Art of Human-Drone Interaction : A Survey. *IEEE Access* 7 (2019), 167438–167454.
 - [45] Lauren Thevin, Carine Briant, and Anke M. Brock. 2020. X-Road : Virtual Reality Glasses for Orientation and Mobility Training of People with Visual Impairments. *ACM Trans. Access. Comput.* 13, 2, Article 7 (April 2020), 47 pages. <https://doi.org/10.1145/3444444.3444444>

- org/10.1145/3377879
- [46] Philippe Truillet, Nadine Vigouroux, Antonio Serpa, Mathieu Raynal, and Frédéric Vella. 2019. Démarche de co-conception centrée utilisateur des systèmes d'assistance : la place de l'écosystème (*Journée IHM & Santé*).
- [47] Jelle van Dijk, Niels Hendriks, Christopher Frauenberger, Fenne Verhoeven, Karin Slegers, Eva Brandt, and Rita Maldonado Branco. 2016. Empowering People with Impairments : How Participatory Methods Can Inform the Design of Empowering Artifacts. In *Proceedings of the 14th Participatory Design Conference : Short Papers*, *Interactive Exhibitions, Workshops - Volume 2* (Aarhus, Denmark) (PDC '16). ACM, New York, NY, USA, 121–122. <https://doi.org/10.1145/2948076.2948101>
- [48] Nadine Vigouroux, Frédéric Vella, Dan Istrate, Eric Campo, Loïc Caroux, Nicole Lompré, Philippe Gorce, Julien Jacquier-Bret, Nathalie Pinède, Mathilde Sacher, et al. 2019. Méthode d'observation multimodale de l'accessibilité numérique pour les personnes âgées (*7ème Journées d'Etude sur la Télésanté (JETSAN 2019)*).
- [49] WEPULSIT. 2020. pulsit. <http://wepulsit.com/>.