



ICAM – 2026



INTRODUCTION À LA RÉALITÉ VIRTUELLE

APPLICATIONS EN SANTÉ ET SPORT

ensiiE



guillaume.bouyer@ensiie.fr

www.ensiie.fr/~bouyer/

Mon parcours

Ingénieur en Informatique (ENSIIE, 2003)

Doctorat en Réalité Virtuelle (Université Paris-Sud 11, 2007)

Maître de conférences en Informatique à l'ENSIIE (2008-)

Chercheur au laboratoire IBISC de l'Université Évry Paris Saclay

Réalité Virtuelle, Réalité Augmentée, Interactions Humains-Machines...

Feedbacks Multisensoriels, Mesure d'activité, Mécaniques Ludiques, Adaptation

Rech. génériques et appliquées. Rééducation motrice depuis 2015



Programme Journée 1

Concepts et Historique de la Réalité Virtuelle

Applications en Santé

Canaux sensori-moteurs humains (et Interfaces) de Réalité Virtuelle

Démonstrations

Casques et interactions immersives

Atelier de conception (selon le temps)

Exemples en rééducation

Programme Journée 2

Suite de l'atelier de conception

Autres applications (selon le temps) : 1, 2

Démonstrations

Interface et interactions haptiques

Jeux de rééducation du bras post-AVC

Jeu de rééducation à la marche en RA

Projets de recherche

IBISC SITE PELVOUX

UFR Sciences et Technologies

accès au 36, Rue du Pelvoux

CE1455 Courcouronnes 91020 Évry-Courcouronnes Cédex

RDV Hall B (entrée)



ICAM – 2026



ATELIER : LES TECHNOLOGIES DE LA RV&A AU SERVICE DE LA RÉÉDUCATION MOTRICE

ensiiE



guillaume.bouyer@ensiie.fr

www.ensiie.fr/~bouyer/

The image is a composite of two scenes. The left scene shows a person's hands on a computer keyboard and mouse, with a monitor displaying a 3D virtual environment. The right scene shows a person wearing a VR headset and a dark blue t-shirt, standing in a room with a whiteboard and a door, appearing to be in motion. The entire image has a blue tint.

RÉÉDUCATION MOTRICE EN RV&A

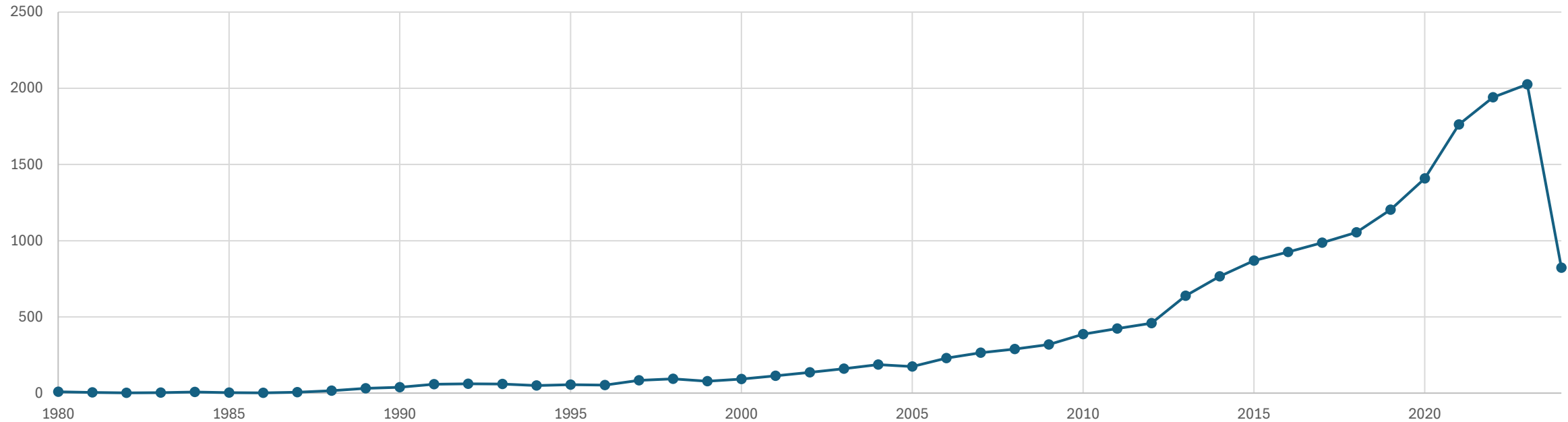
VUE D'ENSEMBLE

Quelques définitions

- *Virtual Rehabilitation, VR-based Rehab.*
 - Thérapies utilisant des technologies de réalité virtuelle et des simulations (Burdea 2003)
- Jeux sérieux (*Serious Games*)
 - Jeux dont l'objectif premier n'est pas le divertissement, le plaisir ou l'amusement (Michael 2006)
 - Applications/activités qui utilisent des éléments et des mécaniques de jeu pour atteindre des objectifs sérieux (ex. formation, éducation)
- Jeux vidéo actifs (*Active Video Games AVG*) / Exergames
 - Jeux vidéo qui exigent une activité physique supérieure à celle d'un jeu classique. Reposent sur des technologies de suivi des mouvements du corps (LeBlanc 2013)
 - Jeux qui promeuvent l'exercice physique pour améliorer la santé et le bien-être

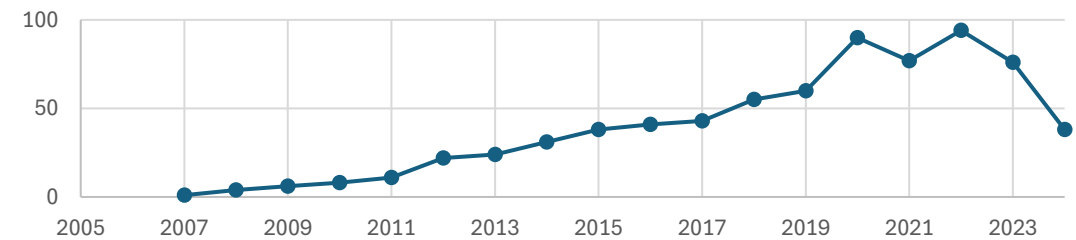
Une recherche en plein essor

VR Rehabilitation and co.



Évolution du nombre de publications
Source : PubMed 06/24

"Active video games"



Estimation du Marché



ScienceSoft
https://www.scnsoft.com › healthcare · Traduire cette page

Virtual Reality (VR) for Rehabilitation: Tech Overview

In 2022, the **VR market** in healthcare is valued at \$628 million. It's expected to reach \$6.2 billion by 2029 growing at a CAGR of 38.7%. **Rehabilitation** is among ...
[How VR for rehab works](#) · [Success stories](#)

LinkedIn · Trend Sculpt Studios
il y a 5 jours

Virtual Reality Rehabilitation System Market Research ...

The "Virtual Reality **Rehabilitation System Market**" reached a valuation of USD xx.x Billion in 2023, with projections to achieve USD xx.

Market Research Future
https://www.marketresearchfuture.com › ... · Traduire cette page

Virtual Reality in Therapy Market Report - Forecast 2032

The Virtual Reality in Therapy **market** is projected to grow USD 10.13 Billion by 2032, exhibiting a CAGR of 31.20% during the forecast period (2024 - 2032).

GlobeNewswire
https://www.globenewswire.com › ... · Traduire cette page

VR Stroke Rehabilitation Market Worth US\$ 376 Billion by

10 mai 2023 — **VR Stroke Rehabilitation Market** Worth US\$ 376 Billion by 2033 Globally, at a CAGR of 9.2%, Says Future **Market** Insights, Inc. · With a **market** ...

- De 135m\$ en 2022 à 371m\$ en 2030
- De 325m\$ en 2021 à 2,3M\$ en 2030
- De 145M\$ 2022 à 376M\$ en 2033 (AVC)
- De 628m\$ en 2022 à 6,2M\$ en 2029
- ...
- Mindmaze 2023
 - Valorisation 1M\$
 - CA 30m\$/an

Source : Google 06/24

Enjeux en rééducation



Vieillesse, Nombre de patients en augmentation

Manque de moyens humains et financiers

Difficultés d'accès aux soins, aux dispositifs

Manque d'adhésion et d'observance aux traitements,
fatigue, démotivation

Complémentarité des technologies et du jeu

11



Usage en autonomie voire à domicile

Mesures et Feedbacks des performances

Automatisation du paramétrage, Gain de temps

Situations nouvelles, inaccessibles

Motivation par le jeu, variété, challenge, amusement

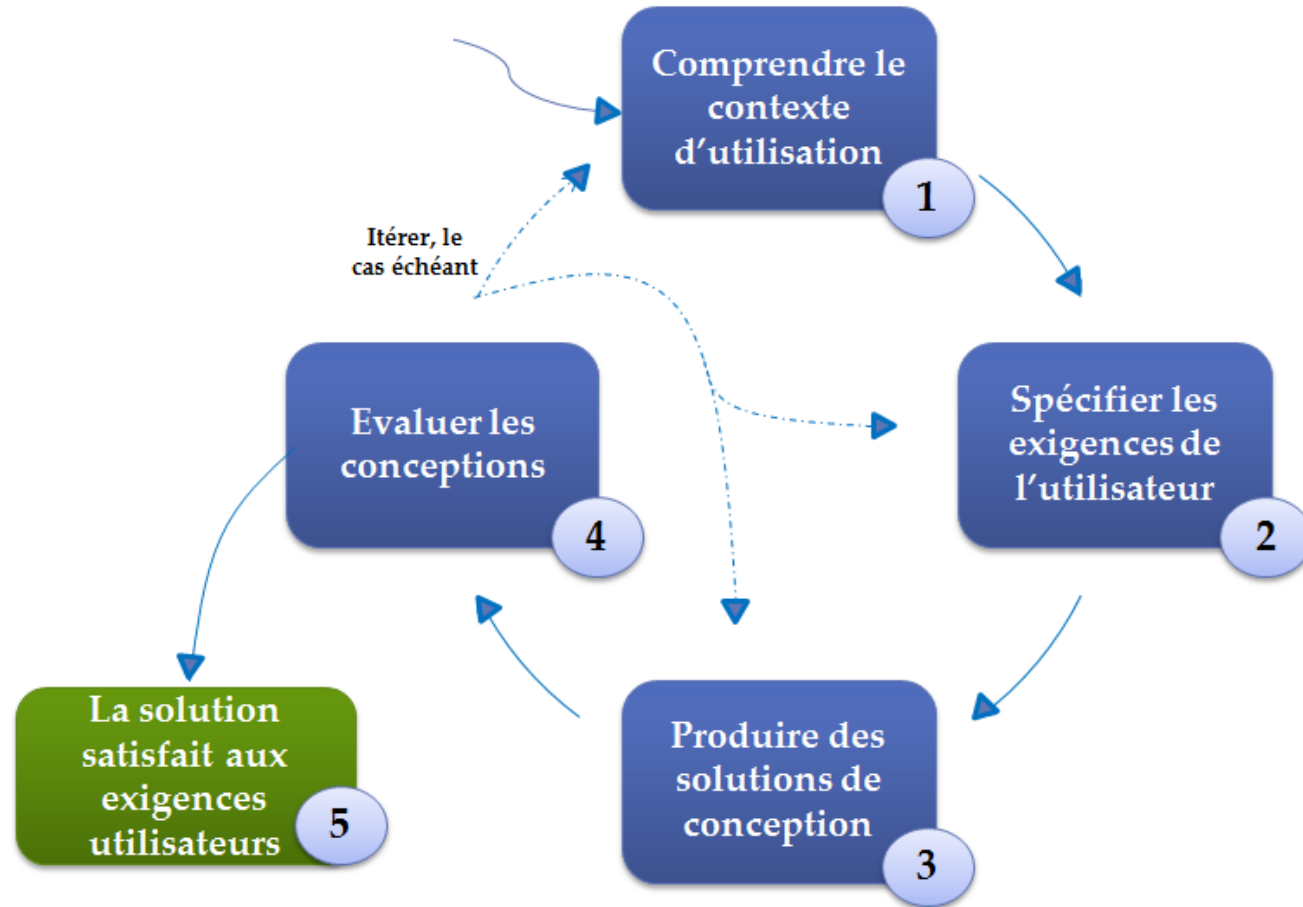


PROCESSUS DE CONCEPTION

D'UN PROJET INTERACTIF

Conception centrée utilisateur

13



J. Veytizou, G. Thomann, F. Villeneuve. Un produit universel pour une interface sur mesure.
Colloque Jeunes Chercheurs et Jeunes Chercheuses, Jun 2013, France.

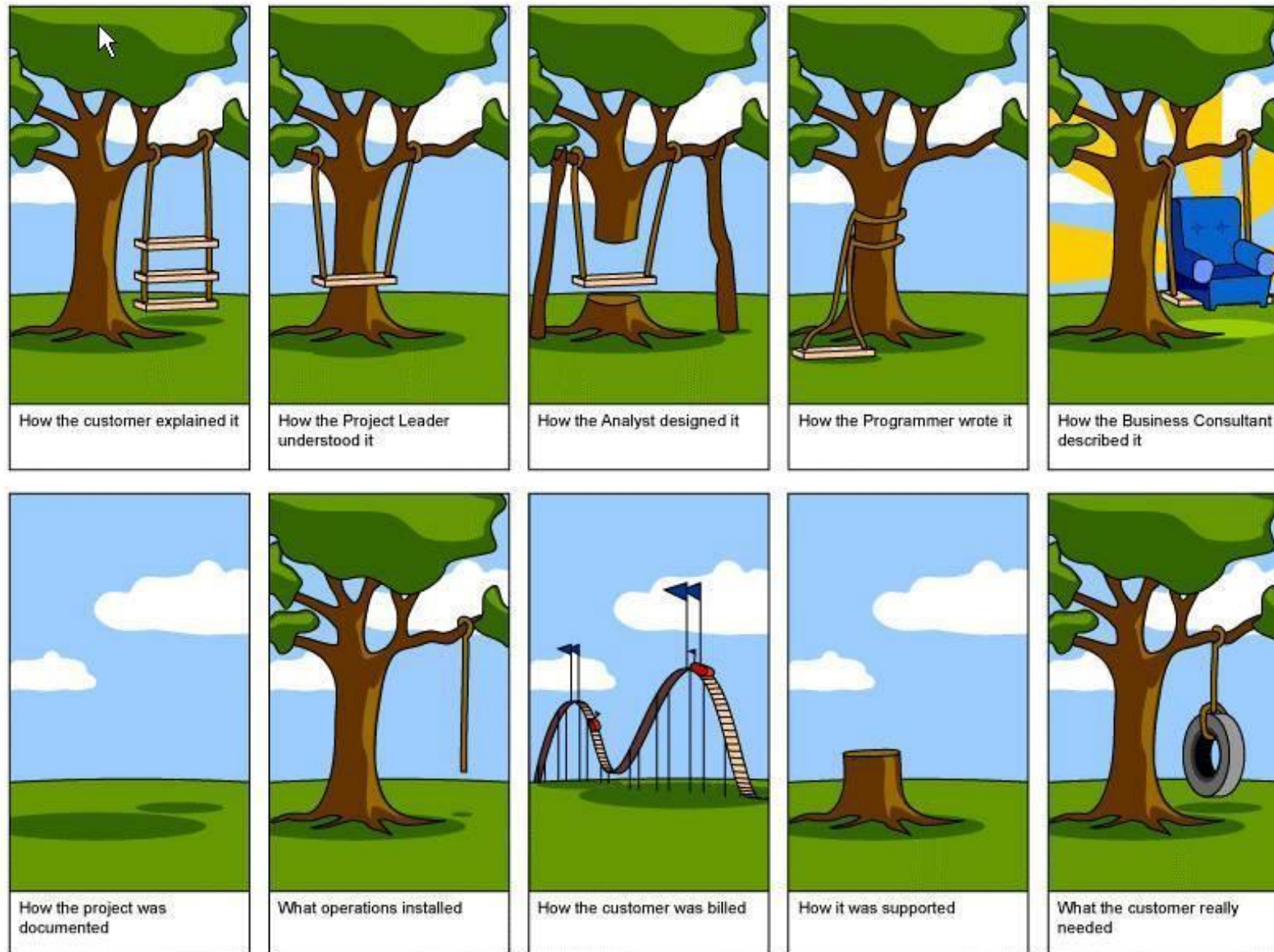
Analyse des besoins des utilisateurs

- Analyse et formalisation de l'activité existante
- Quelles activités/objectifs dans l'environnement virtuel ?
Quels comportements/bénéfices attendus du système ?
- Quels utilisateurs ?
 - Utilisateurs principaux : patients
 - Utilisateurs secondaires : thérapeutes
 - Nombres ? Diversité ?
 - Profils (capacités sensori-motrices, expertise, préférences) ?
- Quelles contraintes (techniques, usage...) ?
- Empathie
 - comprendre l'expérience, la situation des personnes qui vont utiliser

Autres étapes du processus de conception

- « État de l'art »
- Documents de conception
- Choix des interfaces matérielles
 - Doivent servir les interactions et idéalement être choisies après la conception
 - Ne doivent pas aller à l'encontre des besoins
 - Besoin de connaître leur potentiel et leurs limites
 - *Ex : HMD vs. Cave vs Moniteur, Kinect vs Leap Motion, Meta Quest vs Apple Vision Pro...*
- Développement et tests itératifs
 - Ajouts successifs de fonctionnalités/interactions/contenu
 - A valider avec les utilisateurs finaux ou des participants représentatifs
 - Différentes méthodes des plus informelles aux plus scientifiques

Attention aux différences de visions

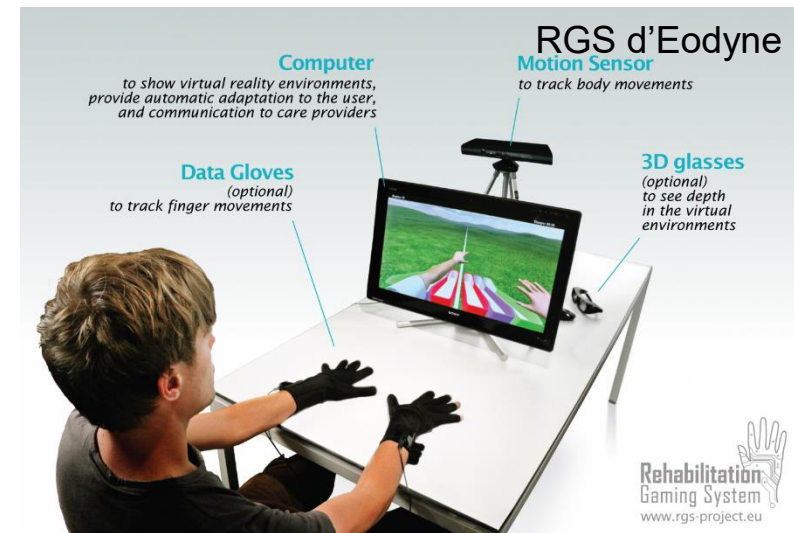




TECHNOLOGIES INTERACTIVES

POUR LA RÉÉDUCATION MOTRICE

Exemples : Rééducation motrice post-AVC



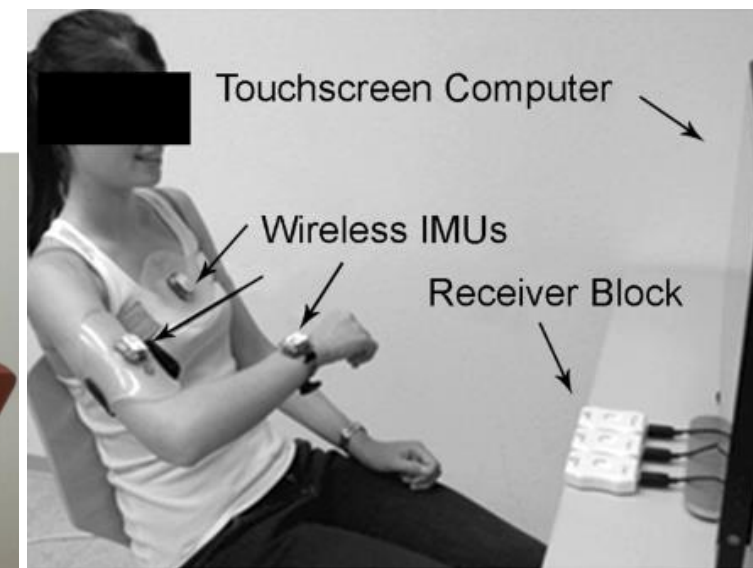
[Jang et al. 2005]



[Ma et Bechkoum 2008]



[Shin et al. 2014]



[Wittman et al. 2016]
ICAM / RÉALITÉ VIRTUELLE

Exemples : Rééducation du membre inférieur



Zebris 2018



ETH Zurich



Description générique

- 2 utilisateurs
 - 1 patient.e
 - 1 thérapeute
- Technologies interactives
 - Capture de mouvement (*tracking*) et Interactions
 - Visualisation
- Tâches/Exercices/Jeux
- Mesures → Feedbacks et Indicateurs de performances
- Avatar du patient
- Paramétrage
- Coaching virtuel

Utilisateurs

- 1 patient.e
- 1 thérapeute
- Présence souvent simultanée



21

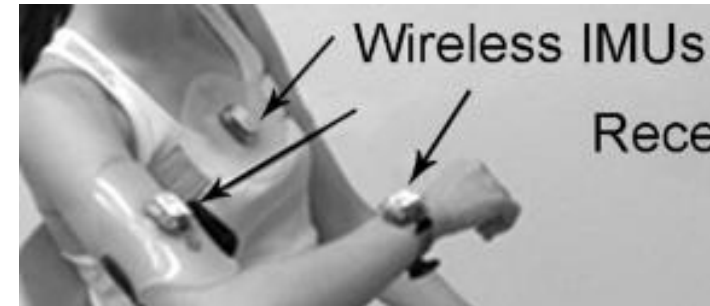


Technologies interactives

- Capture de mouvement et interactions
 - Centrales inertielles
 - Capture optique infrarouge (mocap)
 - Caméras 2D ou 3D
 - Gants de données
 - Objets tangibles, manettes, boutons
 - Autres capteurs et actionneurs : haptique, physio...
- Visualisation
 - Écrans ou surfaces + ou - grands
 - Immersif ou augmenté (casques) : plus récent
- À adapter aux besoins et contraintes
 - Handicaps, assis ou debout...

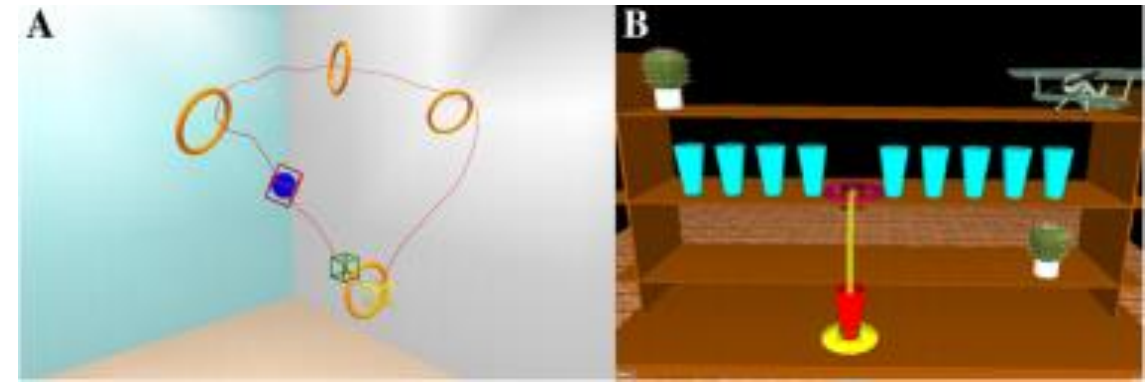


[Choi et al. 2014]



Tâches/Exercices/Jeux

- Basées sur l'expertise thérapeutique et les mouvements
- Types de tâches
 - Écologiques (vie réelle)
 - Pointage
 - Récupération de cibles en mouvements
 - Suivi de trajectoire
 - Plan 2D ou espace 3D
- Principes de l'apprentissage moteur
 - Répétition
 - Intensité
 - Orientées sur objectif fonctionnel
 - ...



[Turolla et al. 2013]



[Jang et al. 2005]

Mindmotion Pro
de Mindmaze



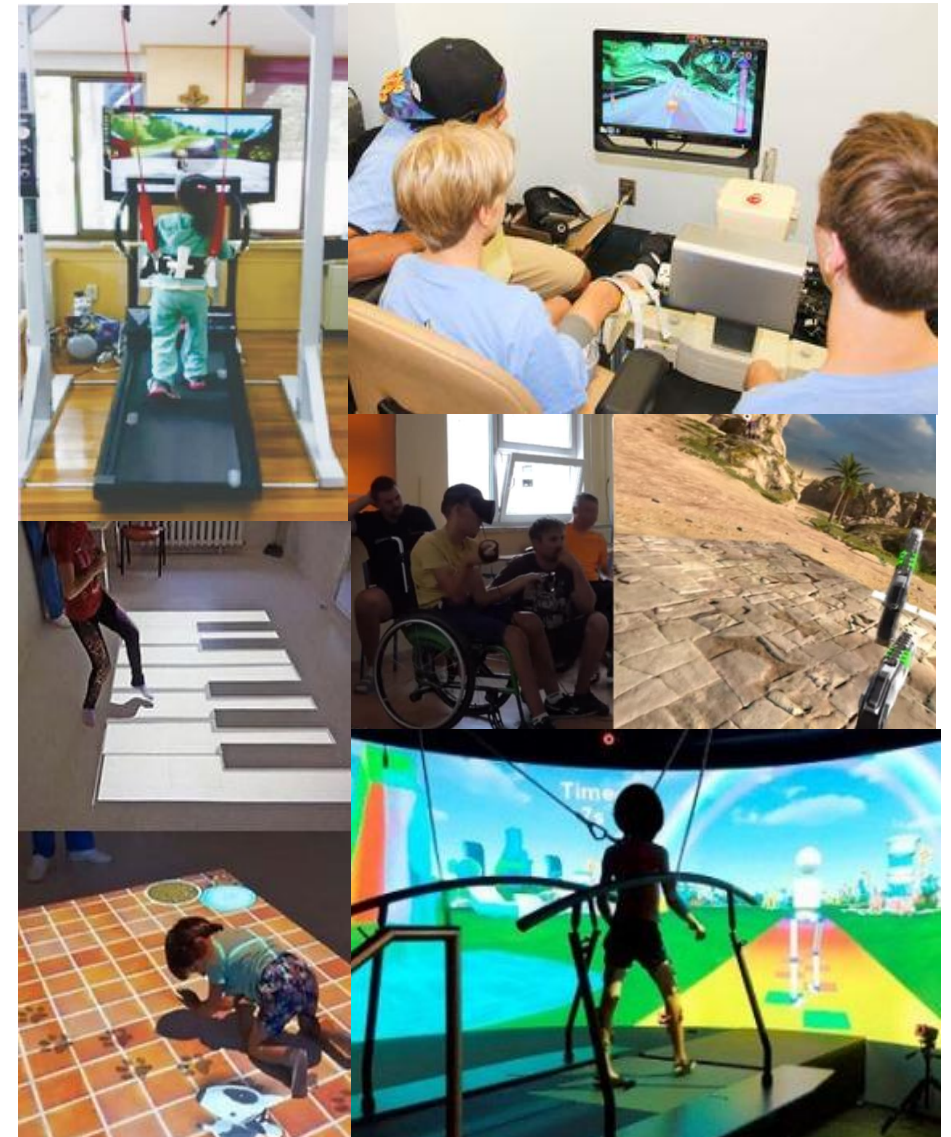
[Kiper et al. 2011]

Tâches/Exercices/Jeux

- Environnement virtuel
- Jeu
 - Rendre les tâches thérapeutiques plus variées, amusantes, et (on l'espère) motivantes
 - Augmenter l'observance, l'intensité, l'adhésion
 - Inclure les proches

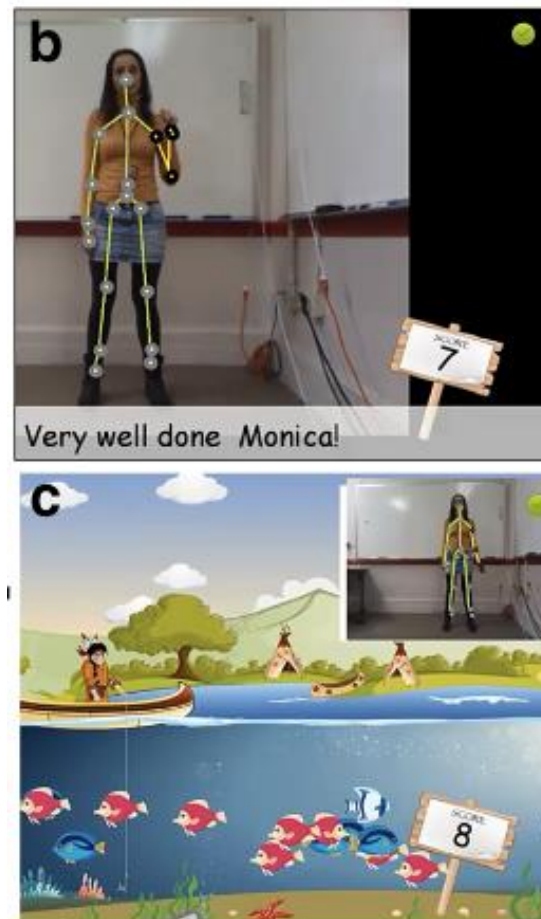


[Shin et al. 2014]



Mesures et feedbacks

- Enregistrer et analyser les données issues de l'activité motrice, pour fournir des informations pertinentes aux patients et thérapeutes
- Feedback (rétro-actions)
 - KR Knowledge of Results / KP Knowledge of Performance
 - Continus / Terminaux
- Formes classiques
 - Scores, récompenses
 - Effets visuels et sonores
 - Tableaux de bord simplifiés ou détaillés
 - Valeurs numériques
 - Graphiques, Historique...



[Cameirao et al. 2016]



RGS (Eodyne)



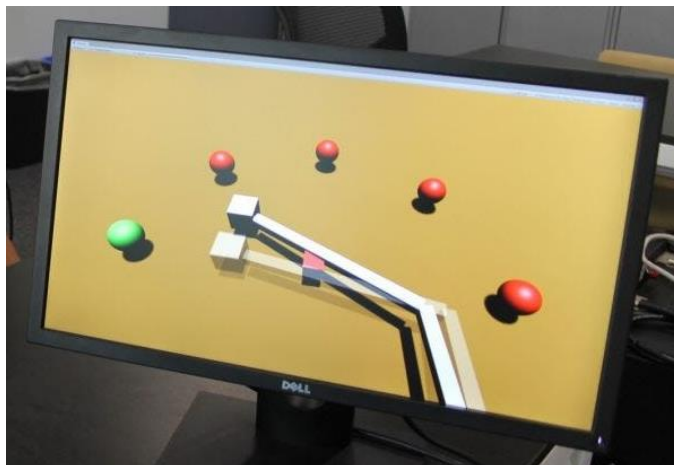
ICAM / RÉALITÉ VIRTUELLE

Mesures et feedbacks

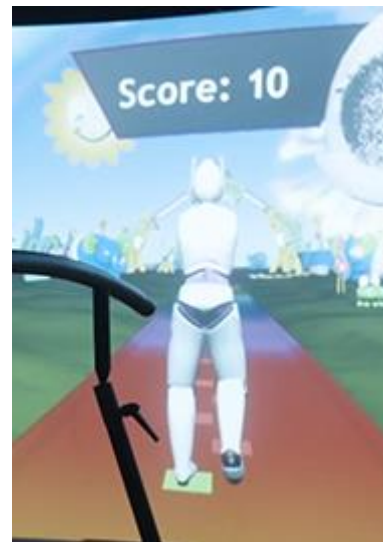
- Avatar
 - Vues variables du corps complet ou du membre concerné
 - 1^{ère} ou 3^{ème} personne
 - Objet ou personnage virtuel
 - Réaliste, simplifié, modifié



Evolv



Stevens Inst. Of tech (2021)



Motek



Hocoma



RGS

Paramètres et Coaching

- Paramétrage
 - Gestion des patients
 - Personnalisation du protocole thérapeutique
 - Personnalisation des exercices
 - Manuel ou assisté
 - Ex. difficulté adaptative
- Coaching
 - Forme de feedback
 - Accompagnement à la performance, la motivation
 - Personnifié ou non
 - Personnalisé ou non



de Kok et al. (2017)

Exemples connexes : Activité physique et sportive

- Etude du geste sportif
- Entraînement sportif professionnel
- Maintien/remise en forme personnels (fitness...)



INRIA

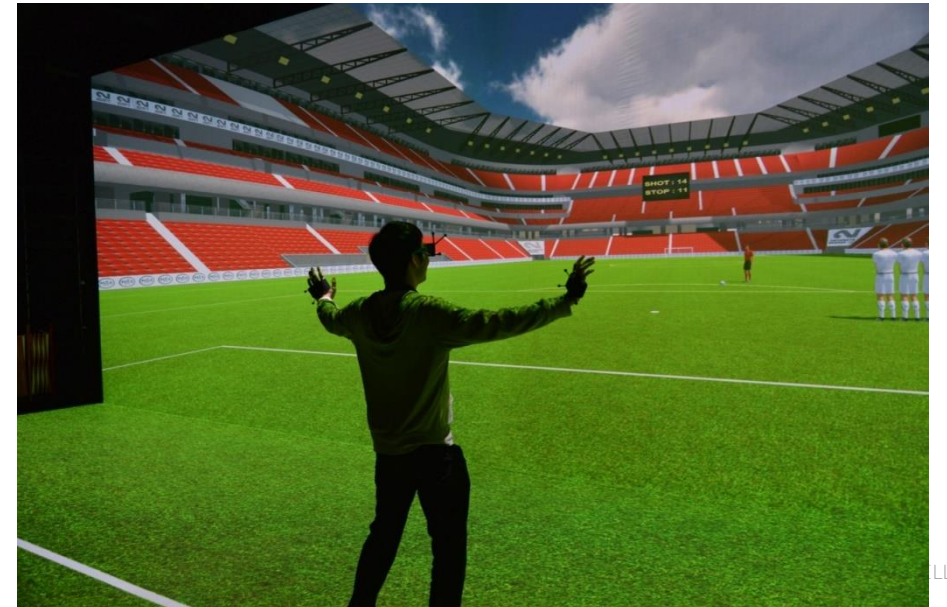


Nintendo Wii

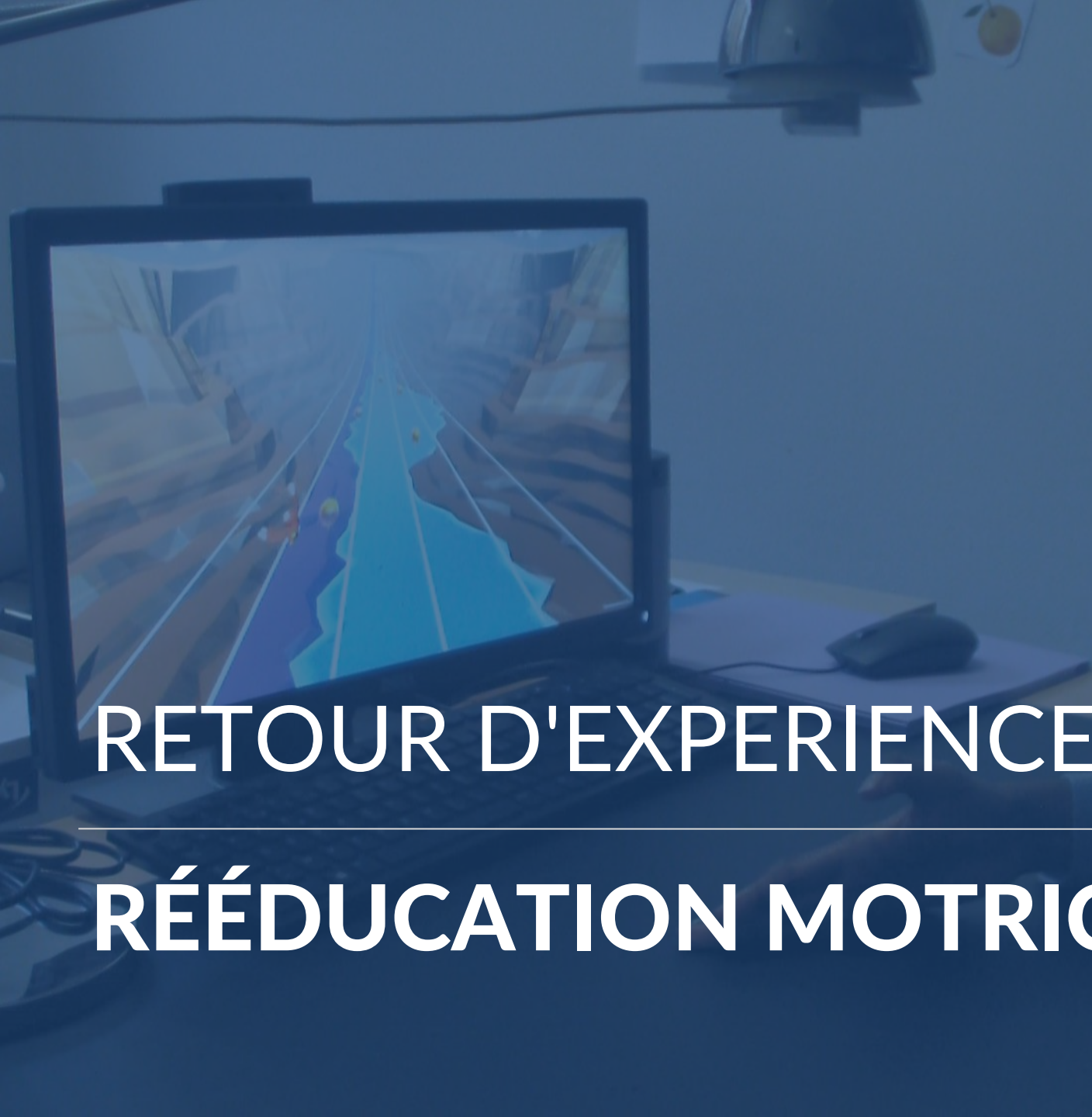


INRIA 2017

CRVM, 2007



- En petits groupes
- Choisissez une pathologie motrice ou une partie du corps à entraîner/rééduquer + le profil des patients/sportifs
- Imaginez le contexte et les pratiques de rééducation actuelles
- Qu'attendez-vous de votre nouveau système en réalité virtuelle ou augmentée ?
Proposez une solution interactive
 - Tâches à réaliser, interactions
 - Interfaces matérielles associées
 - Contenu et fonctionnalités logicielles obligatoires à développer
- Simulez votre solution pour la tester, la confronter au contexte d'usage et aux besoins des utilisateurs. Précisez-la ou adaptez-la si besoin.
- Proposez des fonctionnalités supplémentaires



RETOUR D'EXPERIENCE

RÉÉDUCATION MOTRICE À IBISC

RÉÉDUCATION POST-AVC DU MEMBRE SUPÉRIEUR



CESAAR AVC



université
PARIS-SACLAY *ibiSc*



Région
île de France

Projet cofinancé par le fonds
européen de développement régional.

UNION EUROPÉENNE

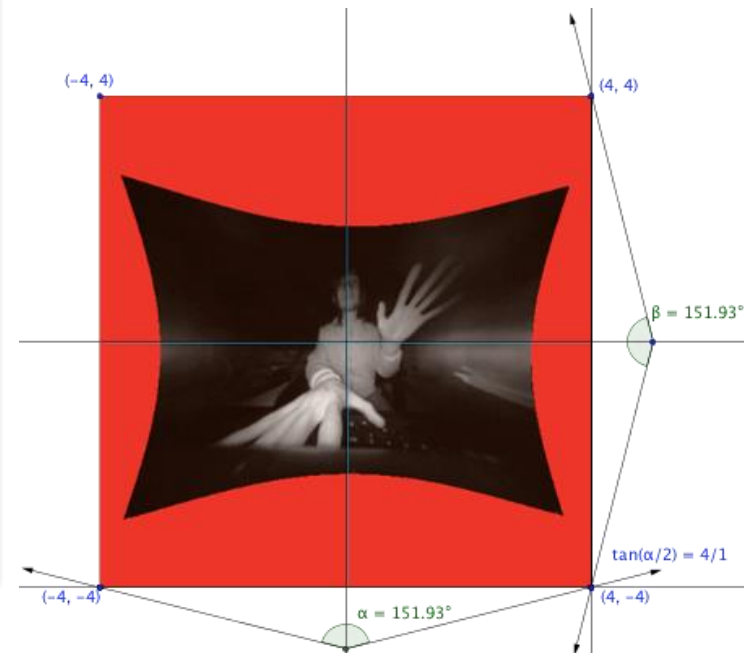
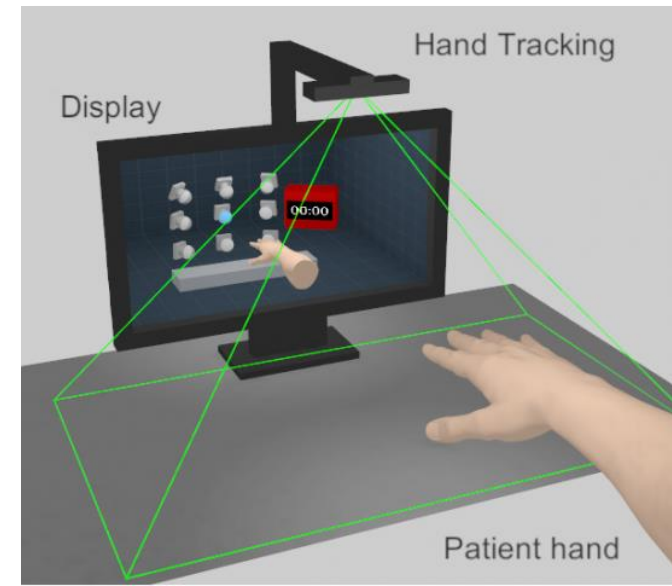
Projet CESAAR-AVC (2016-2022)



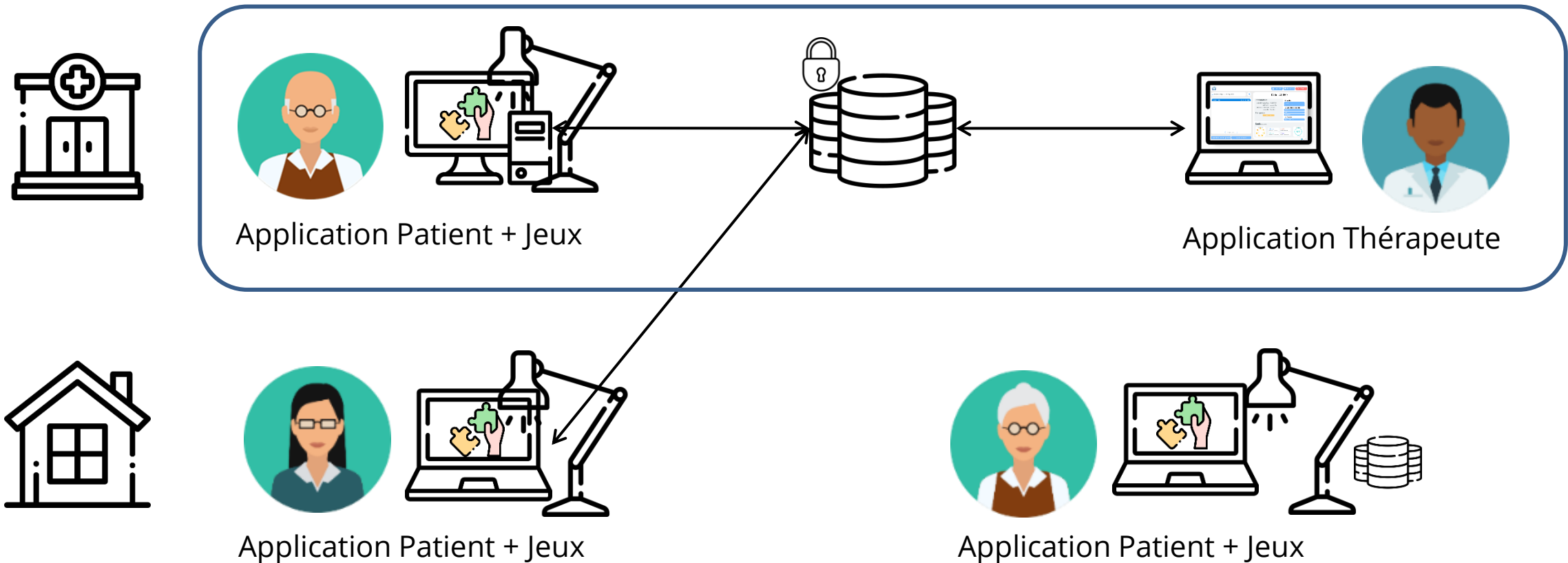
Ce projet est cofinancé par le fond européen de développement régional.

- Utilisateurs
 - Principaux : Patients de tous âges, post-AVC, phases aiguë, subaiguë et chronique, handicaps moteurs, potentiels autres handicaps
 - Secondaires : Médecins et ergo-thérapeutes
- Un système d'assistance à la rééducation
- Autonomie ou semi-autonomie
 - Simple d'installation
 - Pas d'accompagnement en direct
 - Suivi asynchrone
- Bas coût

Dispositifs matériels



Principe d'utilisation



Deux applications : pour les patients et les thérapeutes

36

The screenshot shows the patient interface for 'Alinot Didier'. At the top, there are navigation buttons for 'Accueil', 'Paramètres', and 'Quitter'. The main section is titled 'Protocole Thérapeutique' and features a 'Lancer' button. Below this, there are four activity cards: 'Calibration Pronation Supination Avant-bras' (01min), 'Calibration Pointage Épaule Coude' (01min), 'Jeu de l'oiseau' (01min), and 'Jeu des ponts Épaule Coude' (01min). A central message asks 'Déjà de retour ? Comment vous sentez vous aujourd'hui ?' with five emoji options. At the bottom, it indicates '6 activités restantes' and '06min restantes'.

The screenshot shows the therapist interface for 'Didier ALINO'. It includes a search bar for 'Recherche par nom et/ou prénom'. A card for 'ALINO Didier' shows 'Il y a 3 minutes'. The 'Informations' section lists: 'Date de naissance : 01/03/1954', 'Date AVC : 01/12/2012', 'Membre parétique : Gauche', and 'Latéralité : Gauche'. The 'Thérapeutes' section lists 'Axelle DODI'. The 'Statistiques' section shows a weekly mood chart, '04min' (Temps moyen d'activité global), '29/06' (Date de dernière activité), '06min' (Temps moyen d'activité protocole), '03min' (Durée de la dernière session), and a progress indicator '1/30' (Protocoles terminés).

A message titled 'Vérification de l'installation terminée !' with a green checkmark. It says 'Vous pouvez désormais visualiser vos mains sous le capteur !' and 'Si les mouvements de vos mains semblent incorrects, vous pouvez recommencer cette étape d'installation dans les paramètres.' There are 'Recommencer' and 'Suivant' buttons.

The login screen for 'CESAARAVC'. It displays the name 'Alinot Didier' and the last connection '16/06/2022'. There is a 'Connexion' button.

The 'Missions' screen for 'Niveau 1'. It shows a list of five missions with progress indicators and a 'Commencer' button.

The 'Modifier Patient' form. Fields include: Nom (ALINO), Prénom (Didier), Date de naissance (01/03/1954), Date pathologie (01/12/2012), Membre parétique (gauche), Dominance (gauche), Sexe (homme), Email (didier.alinot@univ-lille.fr), Profession (thérapeute), and Type AVC (stroke).

The 'Protocoles' screen showing a list of protocols with columns for 'Protocoles', 'Statut', and 'Informations'. There are 'Ajouter', 'Supprimer', and 'Sauvegarder' buttons.

The 'Observation du patient' screen showing a line graph with data points and a 'Sauvegarder' button.

The 'Protocole du jour terminé' screen. It asks 'Que souhaitez-vous faire maintenant ?' and offers options: 'Continuer à s'entraîner', 'Consulter ma progression détaillée', and 'Retour au menu principal'.

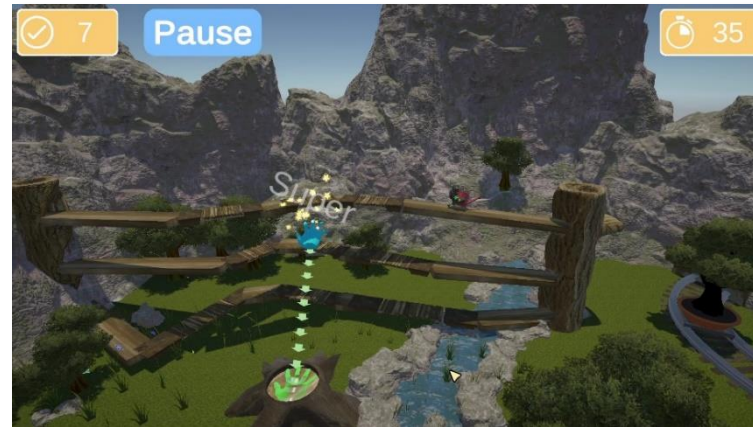
Patient

Thérapeute

3 Jeux



- Prono-supination de l'avant-bras
- Contrôle d'un oiseau dans un « runner »



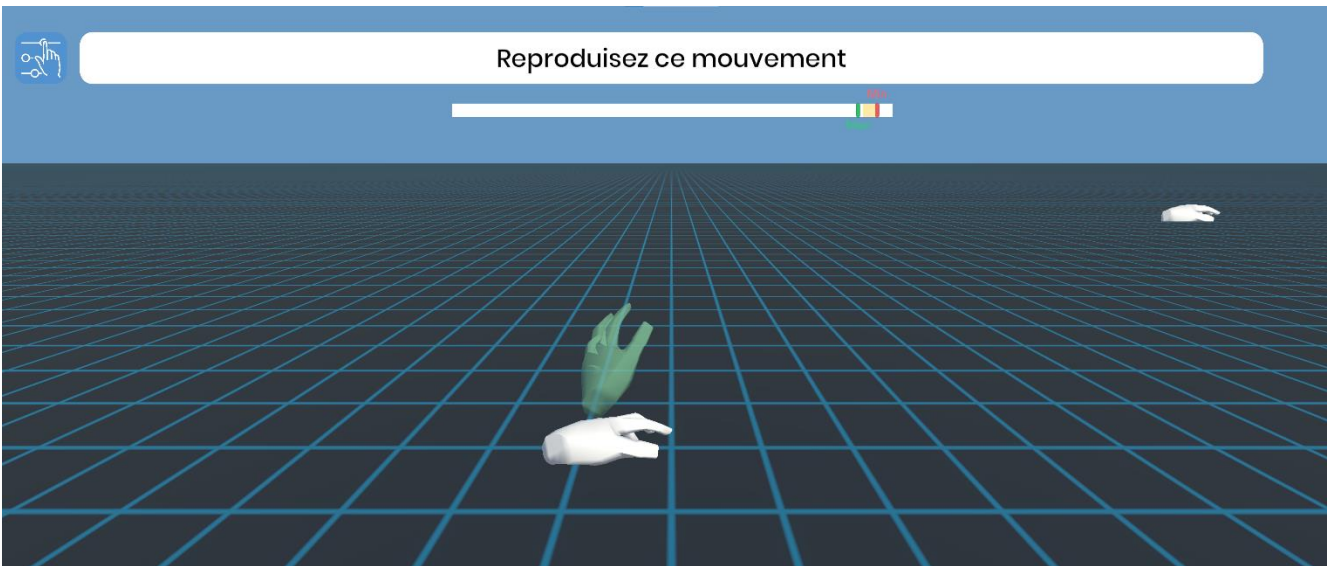
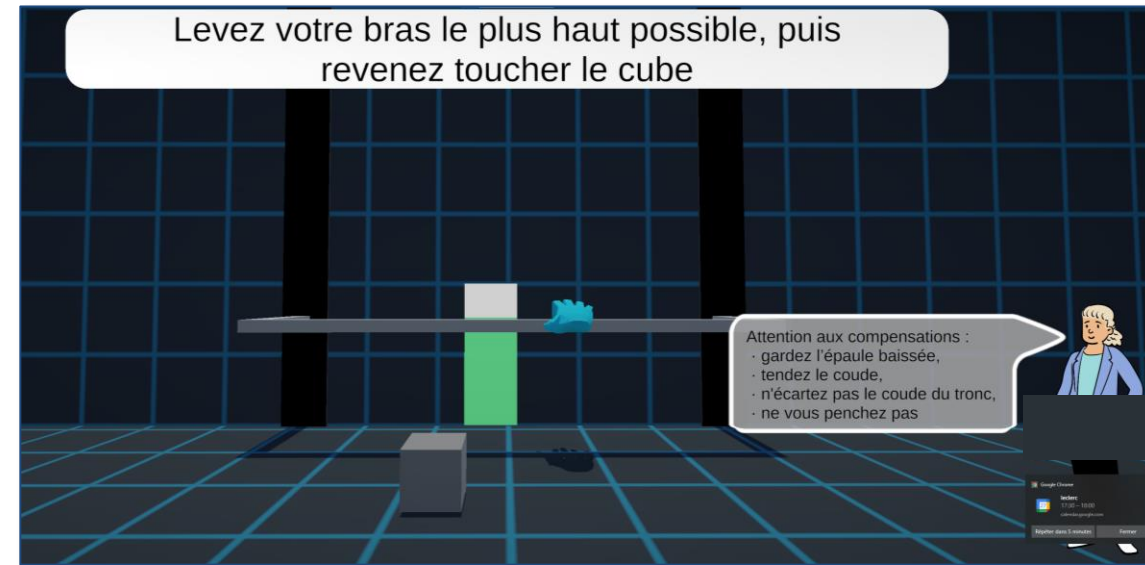
- Pointages de cibles
- Allers-retours répétés entre une zone de repos et des ponts à reconstruire



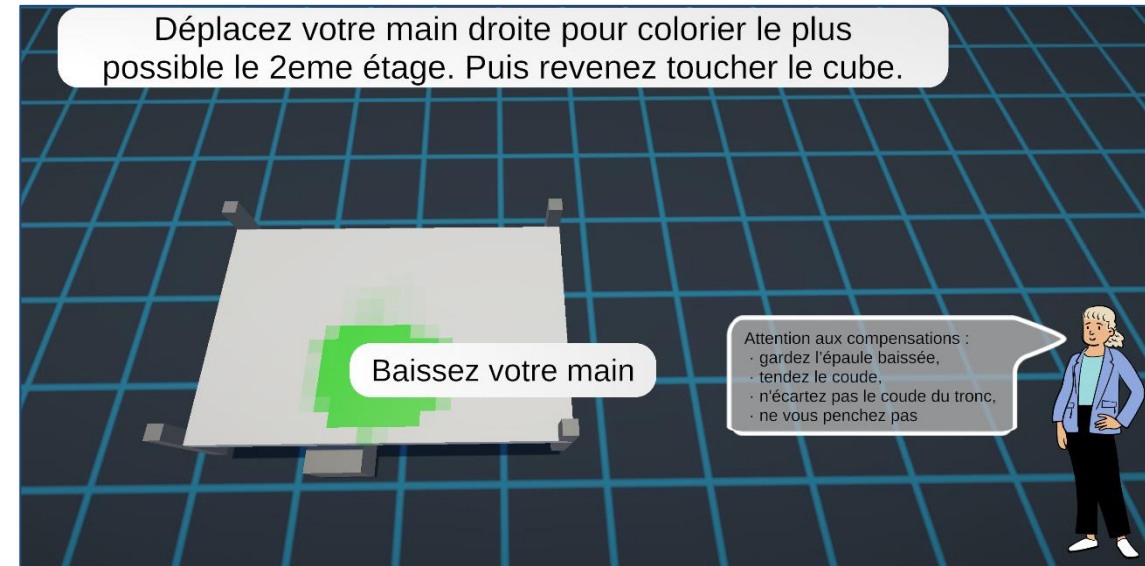
- Suivi précis de trajectoire courbe
- Activation d'une suite d'objets
- 2 modes : Horizontal/Vertical

2 Exercices de calibration

- Evaluation des capacités sur tâches guidées
- Adaptation des jeux aux patients



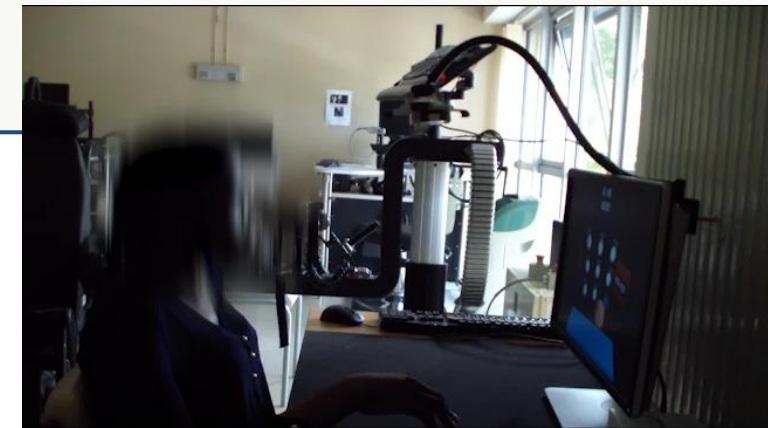
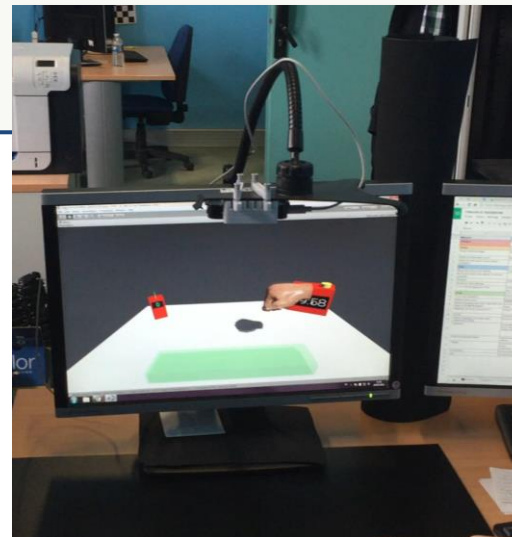
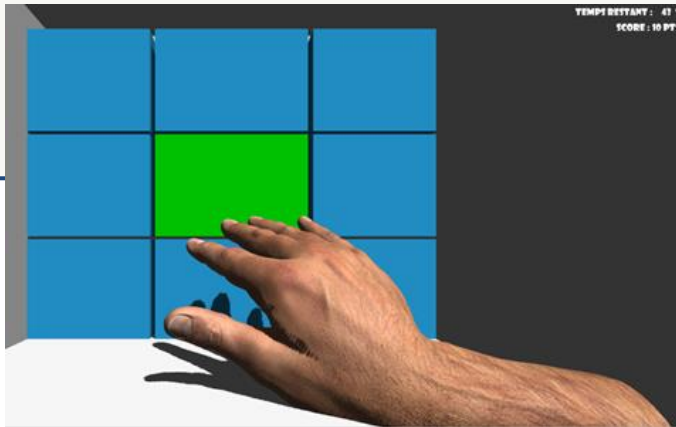
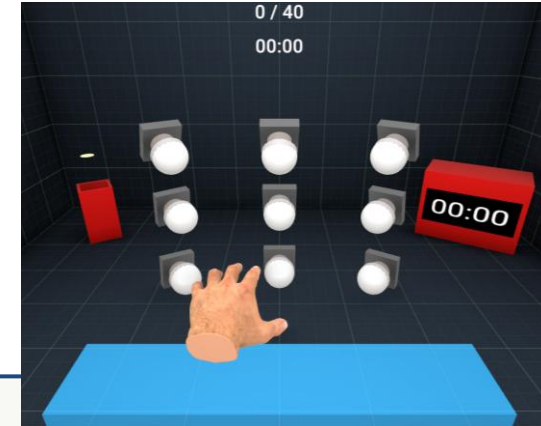
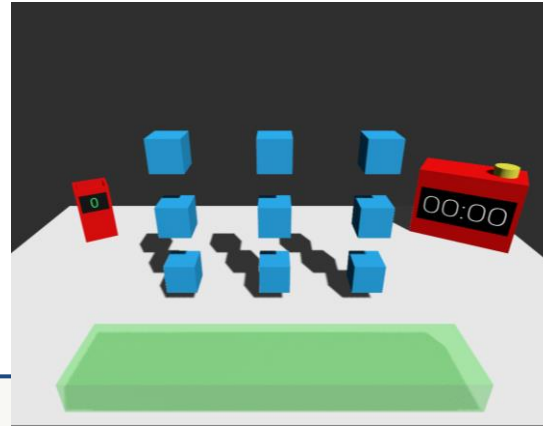
Angles de prono-supination



Amplitude de mouvement épaule-coude

Détails de conception

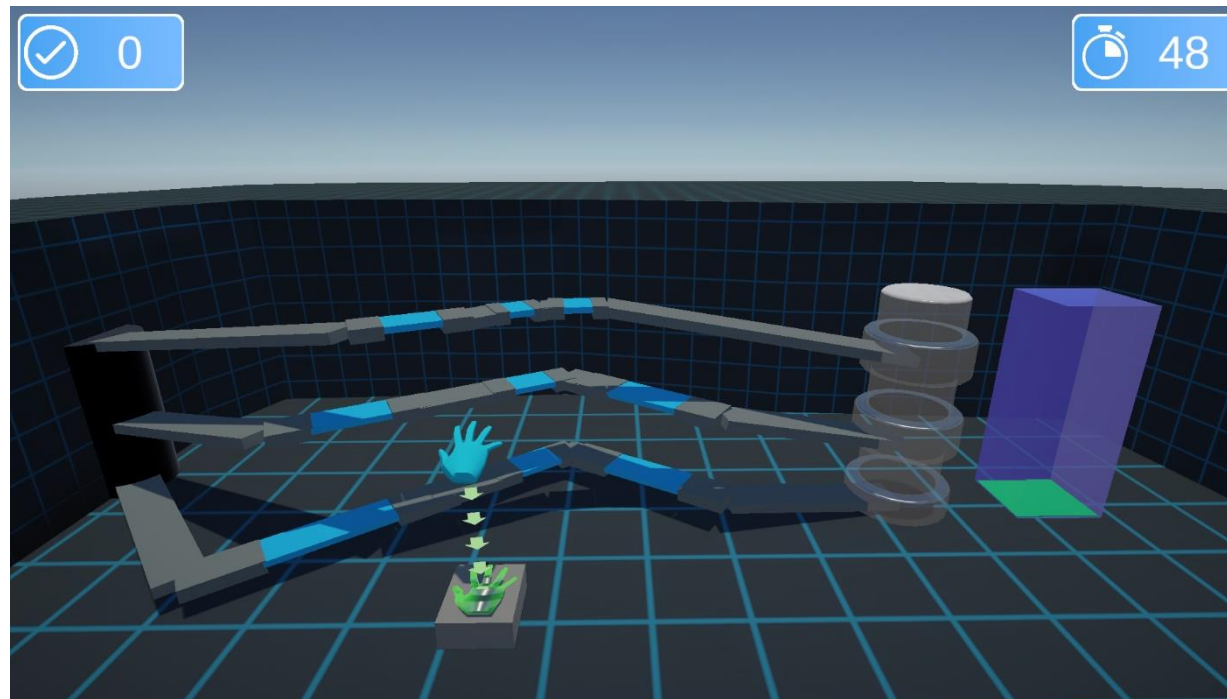
- Prototype du dispositif
- Mouvement et mécanique thérapeutique
- Avatar de main



Détails de conception

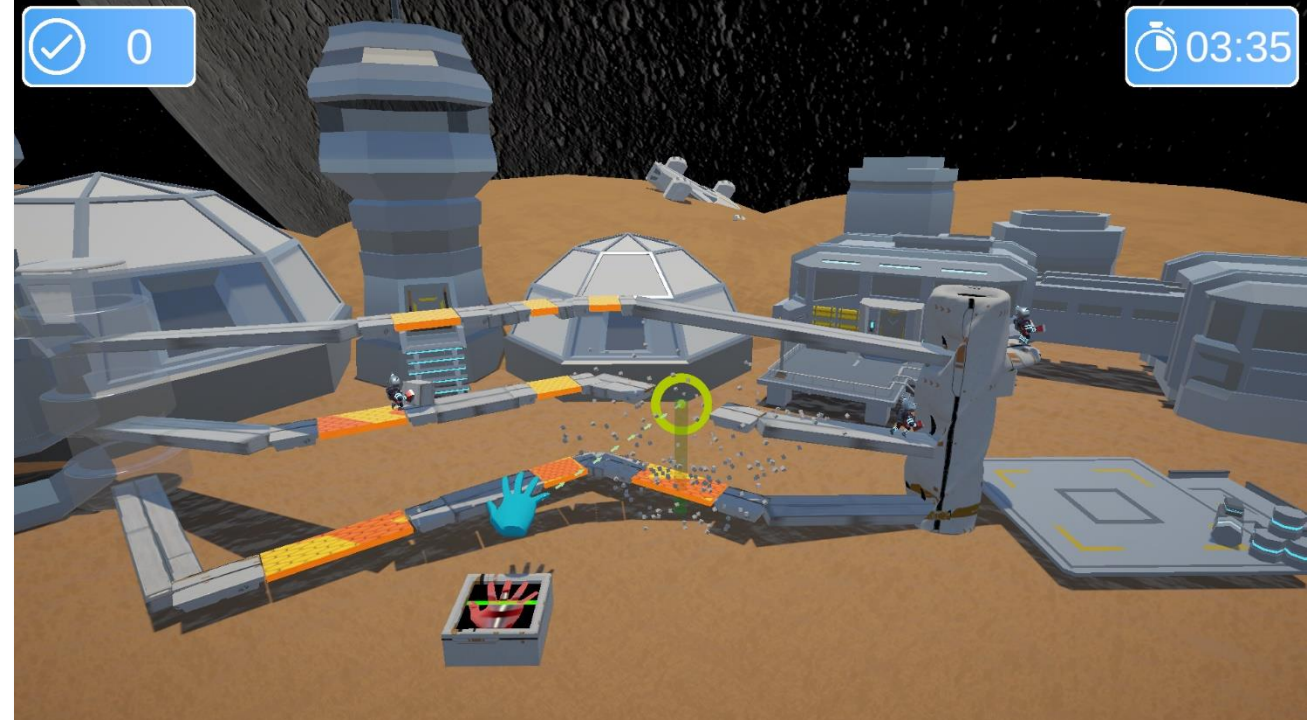
40

- Jeu/Gameplay/Environnement
 - Aide d'un personnage sympathique en construisant des ponts
 - Génération à partir de la calibration



Détails de conception

- Assistances à l'interaction
 - Tâche
 - Viseur animé
 - Trajectoire main-cible animée
 - Main fantôme
 - Perception de la profondeur
 - Ombres
 - Parallaxe caméra
 - Contenu de la scène
- Feedbacks
 - Réussite, tentative, échec
 - Sons, textes et effets visuels



Détails de conception

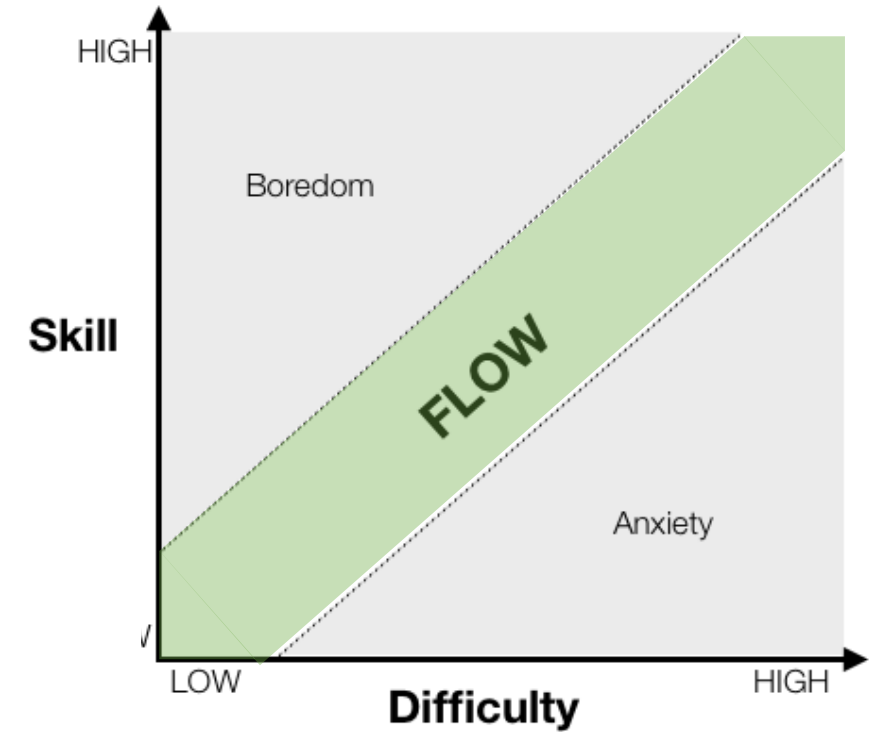
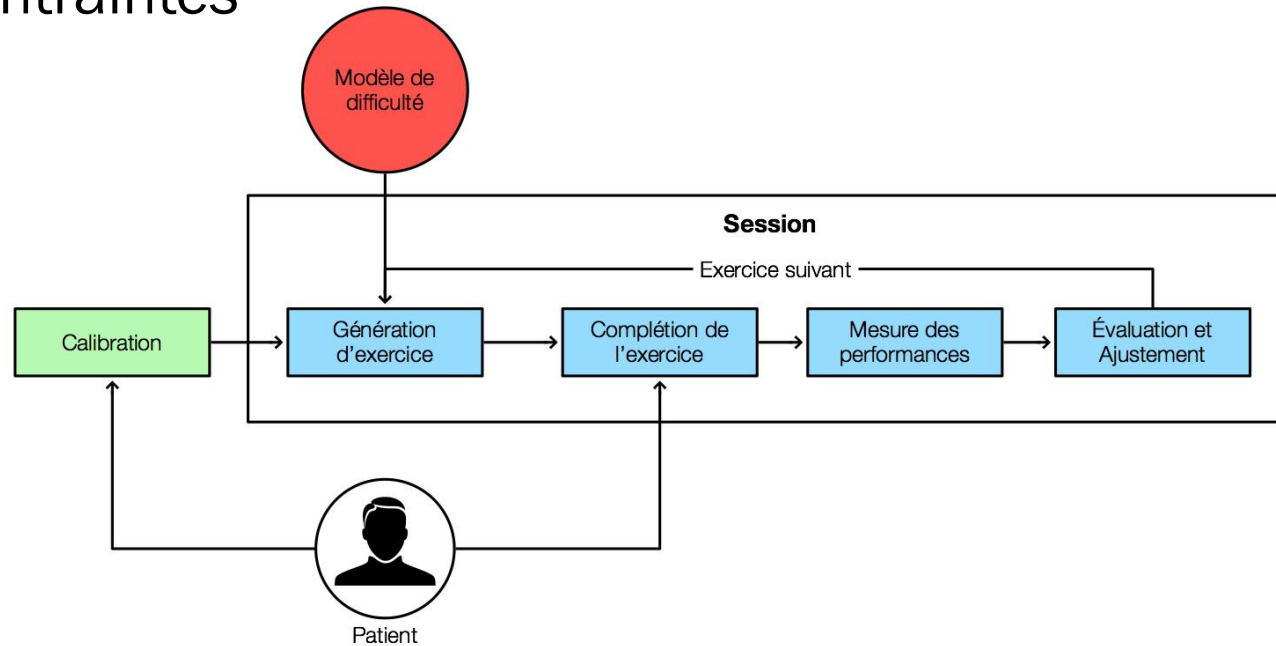
- 4 environnements visuels
 - 1 simple
 - Modèles, textures et animations 3D
 - Couleurs compréhensibles et visibles
- Interface utilisateur 2D (UI)
 - Ergonomie cognitive
 - Temps et score en jeu
 - Informations détaillées finales
 - "Coach"



Aspects motivationnels

43

- Scores
- Théorie du flow
- Modèle de difficulté fondé sur les aptitudes et l'endurance
- Processus d'ajustement par génération de niveaux sous contraintes



(Csikszentmihalyi 1975)

Résultats préliminaires



- Projet très bien accueilli par le grand public, les patients et les thérapeutes
- Dispositif
 - Coût bas
 - Facilement transportable et installable
 - Robustesse logicielle
- Utilisabilité patients
 - Eval. SUS 2019 = 80.1 ± 13.6 (entre *bon* et *excellent*)
 - Courbe d'apprentissage encourageante
- Effets visibles des jeux sur l'activité, et prometteurs sur la motivation



- Adéquation besoins/technologies
 - Limite de la capture de la main pour certains patients (spasticité)
 - Compensations
 - Déficiences visuelles et cognitives
- Perspectives
 - Evaluations expérimentales spécifiques (avatar, profondeur, feedbacks)

RÉÉDUCATION À LA MARCHE



Projet ARROW (2018-2022, 2024-2026)

46



Présente :



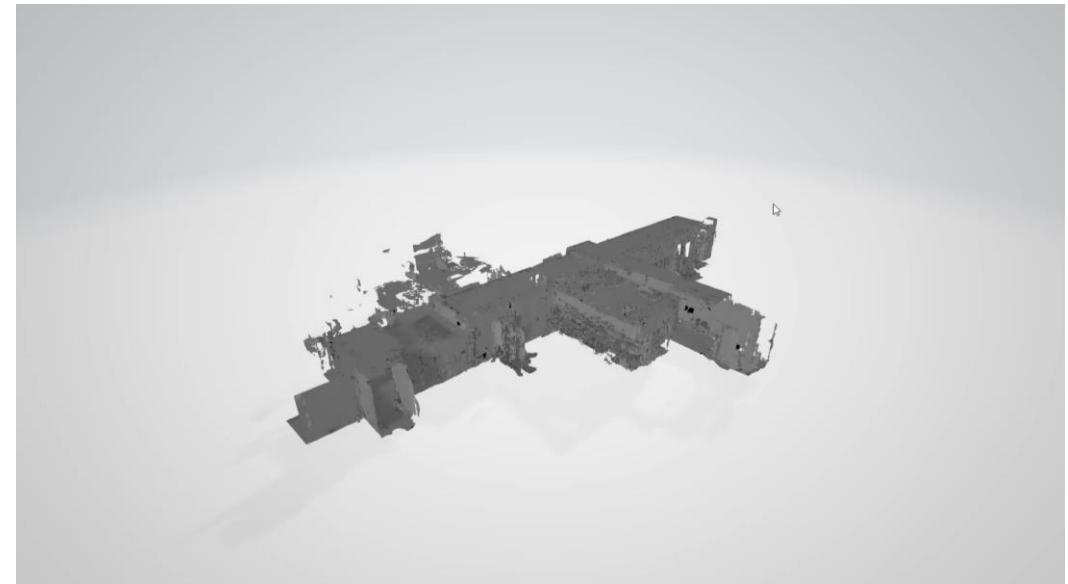
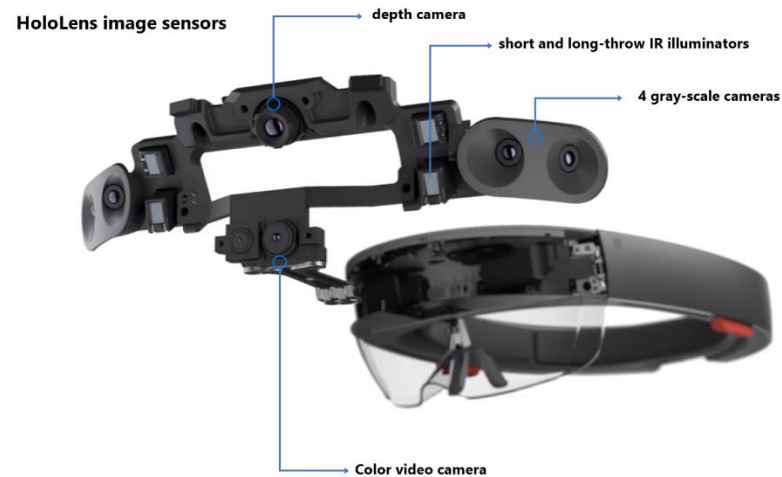
ARROWCP

Un jeu sérieux en réalité augmentée pour la rééducation à la marche

- Utilisateurs
 - Principaux : Patients pédiatriques, paralysie cérébrale, post-opératoire (SEMLS), période 3 - 6 mois après opération
 - Secondaires : Médecins et ergo-thérapeutes
- Objectifs
 - Augmenter la motivation
 - Augmenter la quantité de marche
 - Améliorer la qualité de marche
 - Dans un environnement réel avec aides à la marche

Dispositifs matériels

- Lunettes de RA Microsoft HoloLens
 - Capteurs de pose
 - Vue Environnement réel + éléments virtuels
- Mobile et autonome, installation simple, compatible avec les aides
- MOCAP pour les expérimentations



Processus de conception

- Prototypage, apprivoisement technologique
- Validation de la robustesse du tracking

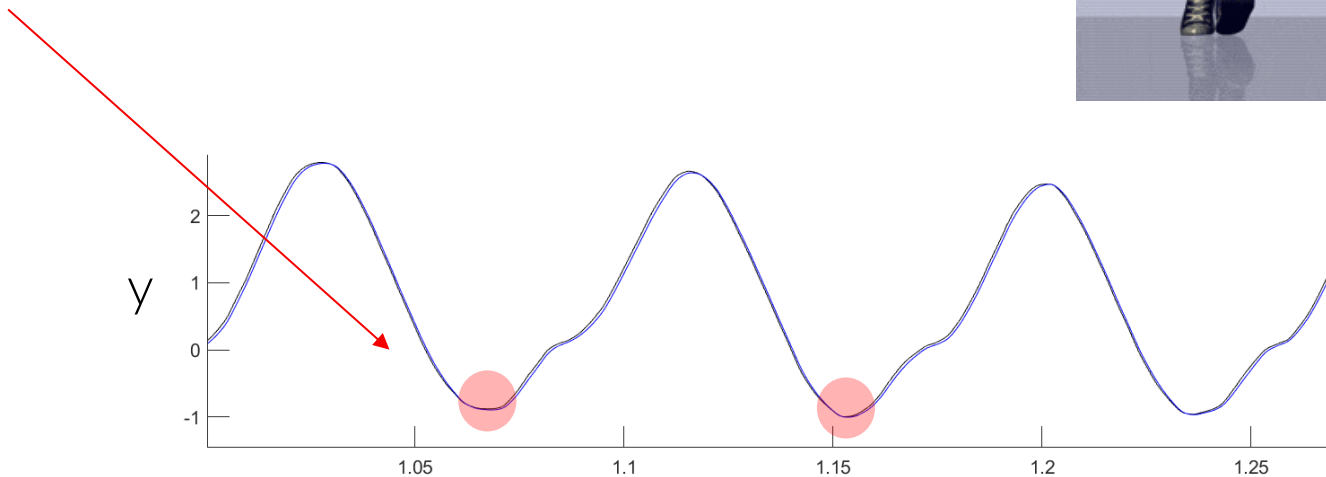
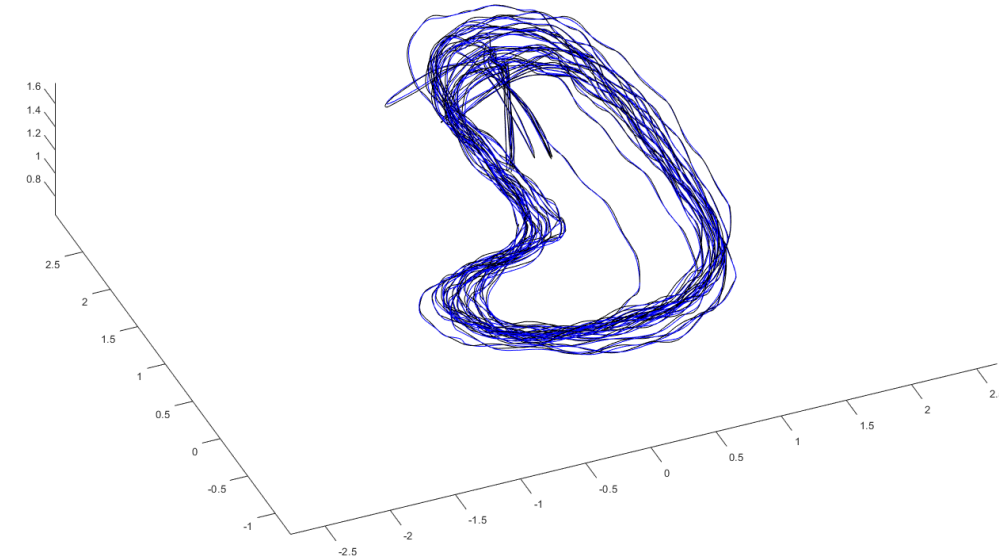
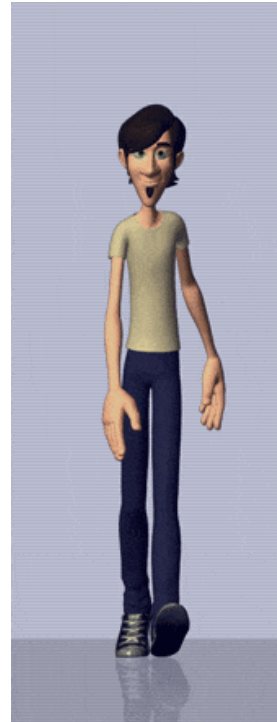


Guinet, A. L., Bouyer, G., Otmane, S., & Desailly, E. (2019). Reliability of the head tracking measured by Microsoft HoloLens during different walking conditions. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 22(sup1), S169–S171.

Mesures des performances de marche

50

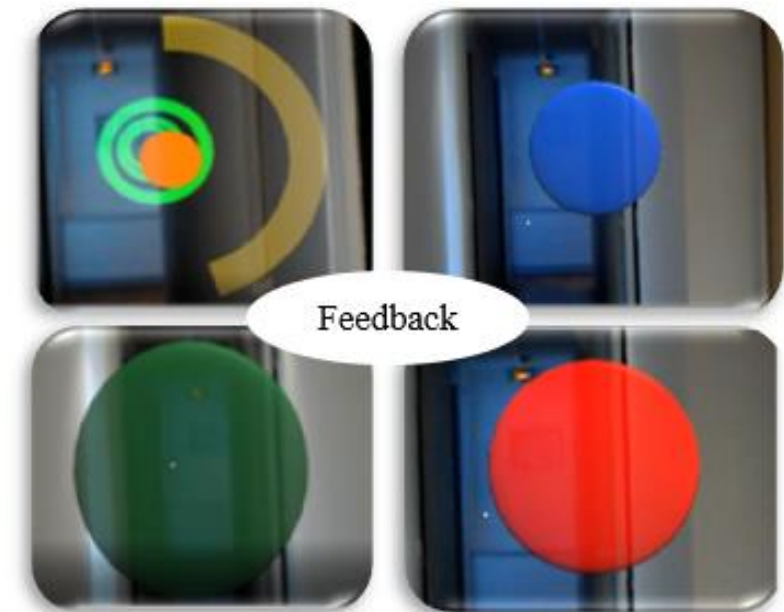
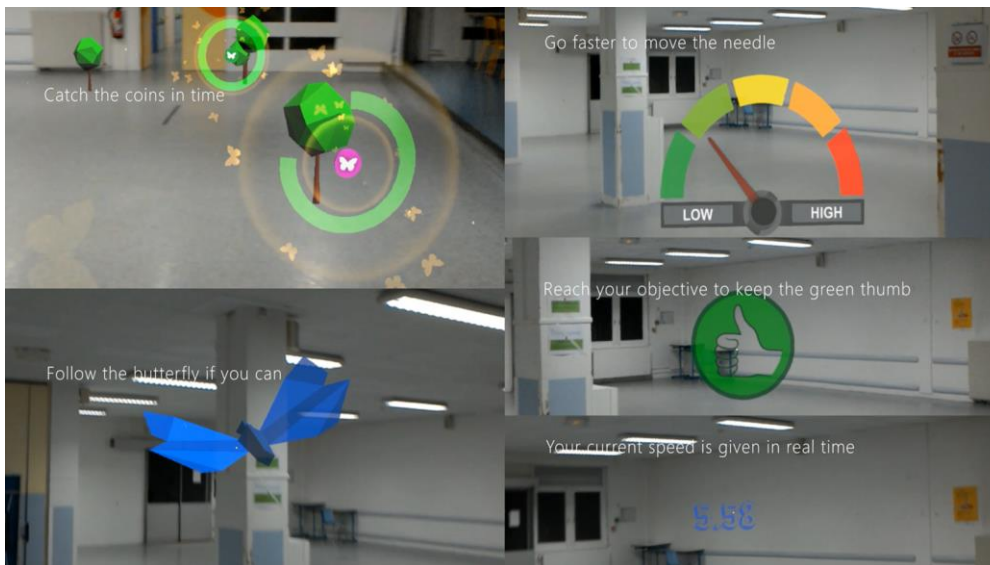
- Hololens => Pose de la tête
 - Chemin parcouru
 - Vitesse
- Filtrages + Seuils => « Heel strikes »
 - Longueur de pas
 - Cadence
 - Distance parcourue



Guinet, A.-L., Bouyer, G., Otmane, S., & Desailly, E. (2021). Validity of Hololens Augmented Reality Head Mounted Display for Measuring Gait Parameters in Healthy Adults and Children with Cerebral Palsy. *Sensors*, 21(8), 2697

Processus de conception

- Raffinement des objectifs thérapeutiques : vitesse
- Choix de la mécanique thérapeutique / tâche
- Recherche et conception des feedbacks
- Pré-expérimentation participants sains
- Expérimentation feedbacks et patients



Processus de conception

52

- Application finale
 - 1 protocole sur 12 séances
 - 1 calibration
 - 1 jeu
 - Des feedbacks
 - Interface graphique dans le casque
- Evaluation clinique





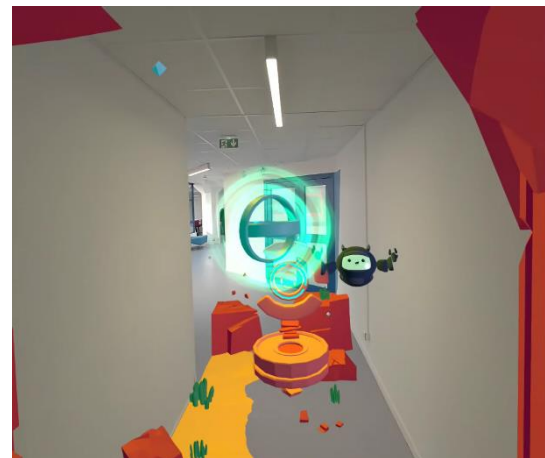
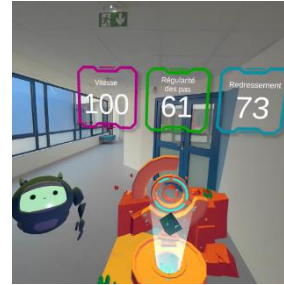
- Détection des paramètres de marche depuis la pose de la tête
- 1^{ers} résultats encourageants sur la performance et l'adhésion des patients
- Résultats en cours sur l'impact des feedbacks sur la vitesse de marche



- Limites technologie Hololens
 - Coût
 - Champ de vision virtuel
 - Poids et ergonomie
- Adhésion patients
 - Limites actuelles du jeu proposé
- Adhésion Thérapeutes
 - Appropriation et utilisation réelle

Maturation industrielle

- Refonte totale
- Nouveau jeu
- Interface tablette
- Portage autres casques
- Partenariat industriel



BILAN

DÉFIS ET OPPORTUNITÉS



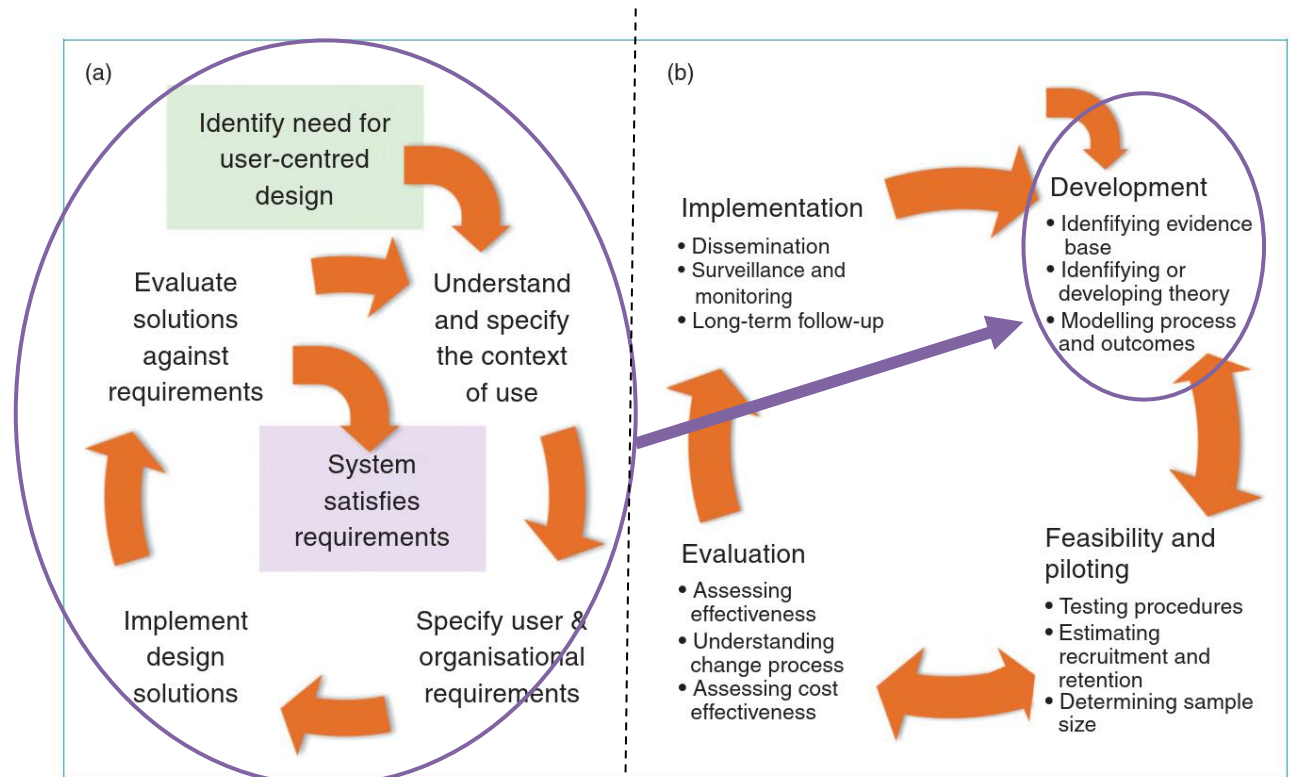
- Domaine vaste, nombreux travaux, notamment pour certaines pathologies (AVC)
 - Résultats souvent positifs sur l'apport thérapeutique mais des biais ou difficilement généralisables
- Complément (et pas remplacement) de la rééducation conventionnelle
 - "Combiner les différentes approches conventionnelles et instrumentées" [Haute Autorité de Santé, 2012]
 - Pas adapté à tous les besoins/patients
- Etudes et développements supplémentaires nécessaires
 - Notamment pour déterminer l'impact de chaque élément

Défis du pluridisciplinaire IHM / Santé

- Approches et expertises différentes

- Vocabulaire
- Méthodes
 - Processus
- Evaluations
 - Utilisabilité
 - Utilité clinique
- Publications
 - Etat de l'art
 - Contenu

➔ Ouverture et communication



Blandford, A., Gibbs, J., Newhouse, N., Perski, O., Singh, A., & Murray, E. (2018). Seven lessons for interdisciplinary research on interactive digital health interventions. DIGITAL HEALTH, 4.

Défis de la conception centrée utilisateurs

- Intégrer les patients et thérapeutes dans le processus
 - Accès et temps
 - Variété des profils et des expertises
- Analyse d'activité
 - Formalisation des pratiques
- Cycle de développement
 - Temps
 - Choix et hiérarchisation des fonctionnalités
 - Itérations chronophages
- Evaluations
 - Choix des méthodes
 - Temps

Défis de la diffusion

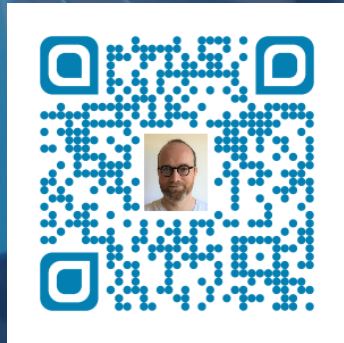
- Implémentation dans les pratiques et les établissements
- Validation clinique
- Contraintes réglementaires (CE, DM...)
- Amélioration continue du produit
- Commercialisation

➔ Financement + Temps + Partenaire industriel

Références principales

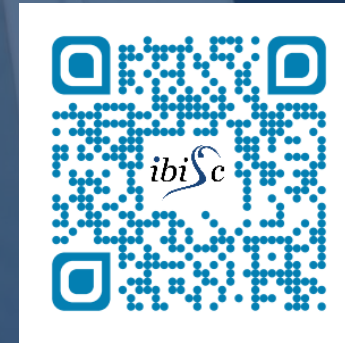
- David, Ludovic (2019). *Conception et évaluation d'un système de réalité virtuelle pour l'assistance à l'auto-rééducation motrice du membre supérieur post-AVC* [Université Paris-Saclay, Université d'Evry]. <https://hal.science/tel-02571389>
- Guinet, Anne-Laure (2022). *Multimodal sensory feedback in augmented reality for gait rehabilitation in children with cerebral palsy* [Université Paris-Saclay, Université d'Evry]. <https://theses.hal.science/tel-04415291>

ATELIER : LES TECHNOLOGIES DE LA RV&A AU SERVICE DE LA RÉÉDUCATION MOTRICE



guillaume.bouyer@ensiie.fr

www.ensiie.fr/~bouyer/



ēnsiie

