

ICAM – 03/06/2025



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 du mardi

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

Exemples en rééducation

Programme du mercredi

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 – 03/06/2025



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 photographs. The left photograph shows a computer monitor displaying a 3D virtual environment with a blue path and various obstacles. A person's hand is visible in the foreground, interacting with the virtual space. The right photograph shows a person wearing a VR headset and a blue athletic shirt, standing in a room and gesturing with their hands as if interacting with the virtual environment. The background includes a white door and a fire extinguisher.

RÉÉDUCATION MOTRICE EN RV&A

VUE D'ENSEMBLE

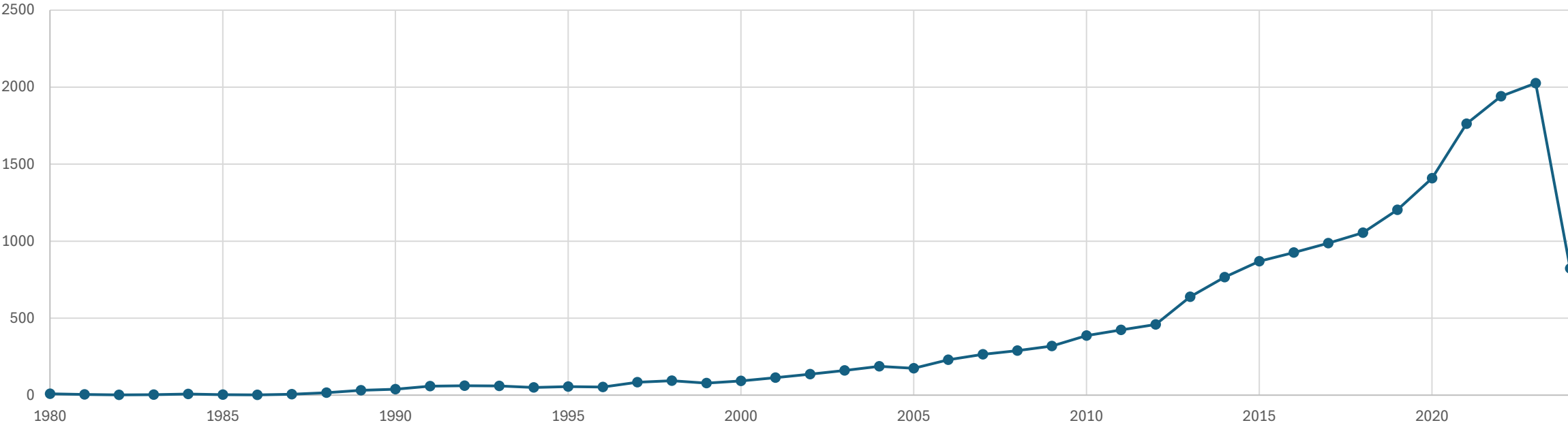
Quelques définitions

7

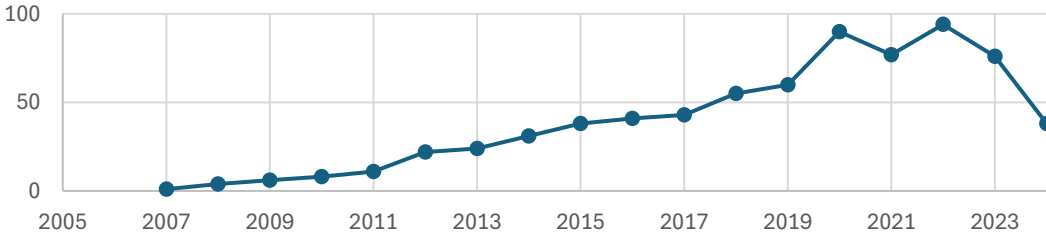
- *Virtual Rehabilitation, VR-based Rehab.*
 - Thérapies utilisant des technologies de réalité virtuelle et des simulations (Burdea 2003)
- Jeux sérieux (*Serious Games*)
 - Jeux dont l'objectif premier n'est pas le divertissement, le plaisir ou l'amusement (Michael 2006)
 - Applications/activités qui 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

Evolution des publications

VR Rehabilitation and co.



"Active video games"



Source : PubMed 06/24

Estimation du Marché

9

Google

 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 10



Usage en autonomie voire à domicile

Mesures et Feedbacks des performances

Automatisation du paramétrage, Gain de temps

Situations nouvelles, inaccessibles

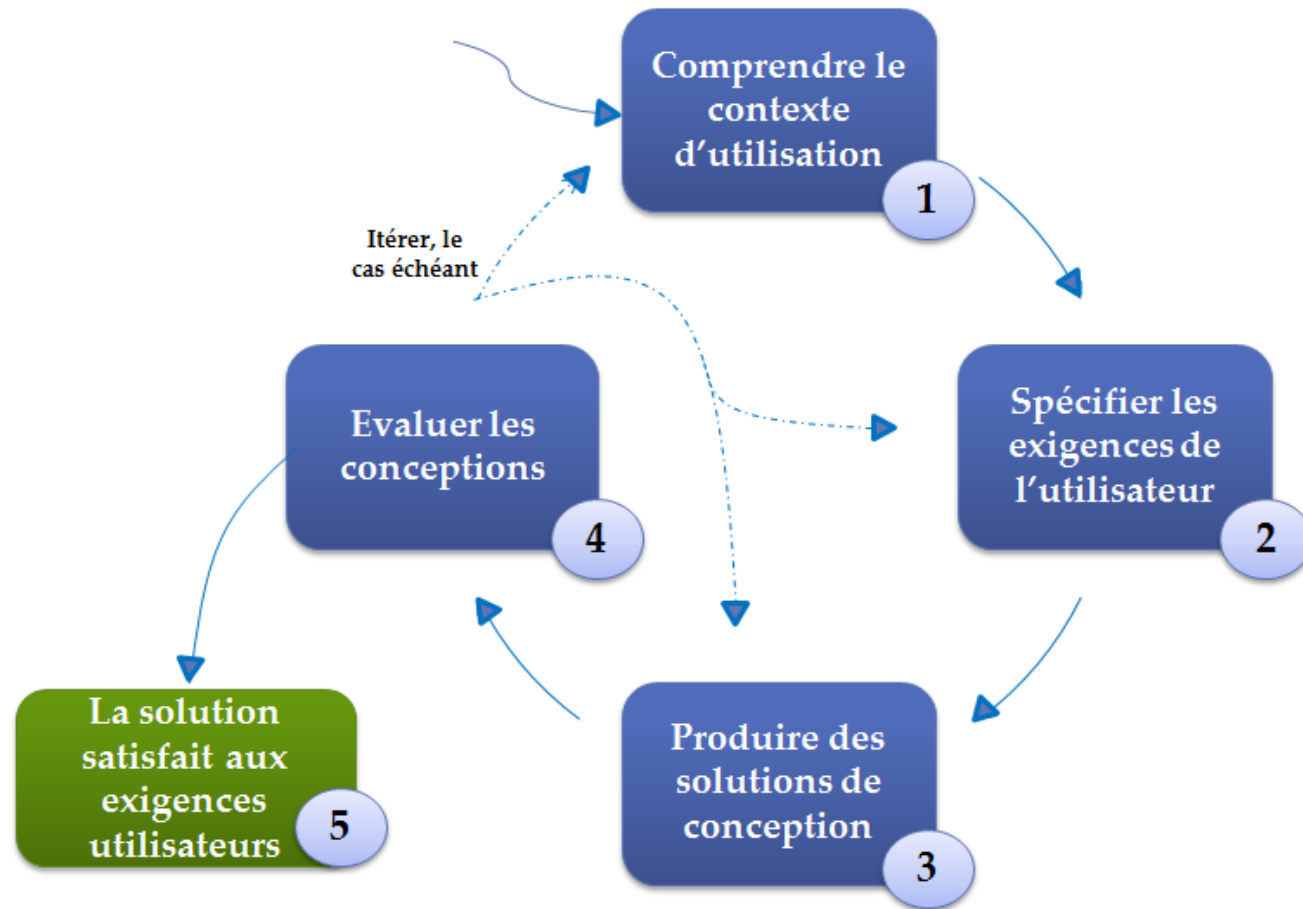
Motivation par le jeu, variété, challenge, amusement



PROCESSUS DE CONCEPTION

Conception centrée utilisateur

12



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

13

- 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



How the customer explained it



How the Project Leader understood it



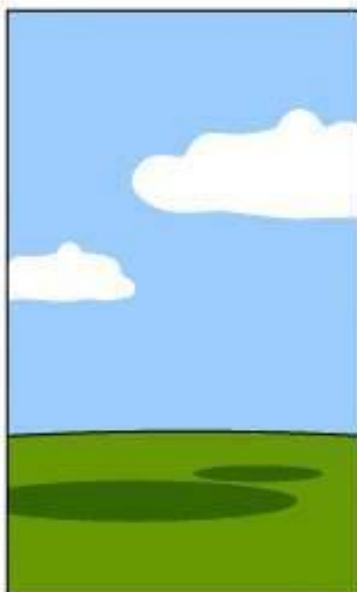
How the Analyst designed it



How the Programmer wrote it



How the Business Consultant described it



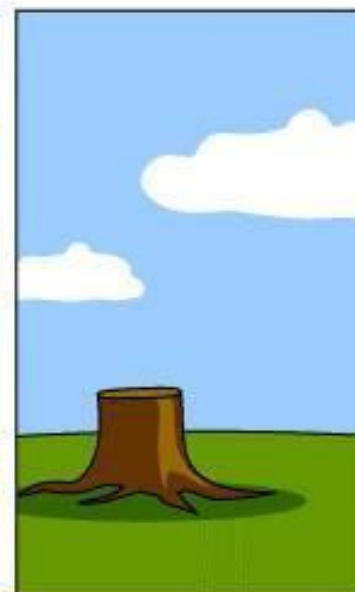
How the project was documented



What operations installed



How the customer was billed



How it was supported



What the customer really needed

Processus de conception

15

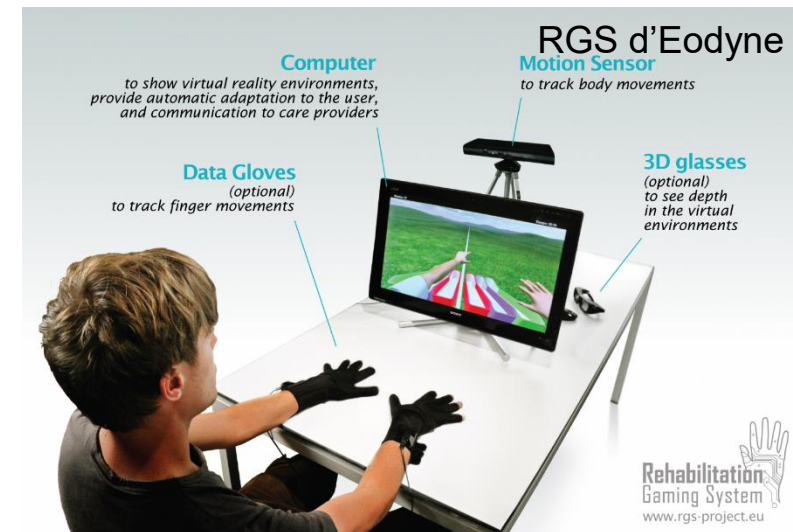
- « État de l'art »
- Documents de conception
- Choix des interfaces matérielles
 - Doivent servir les interactions et idéalement être choisies après la conception
 - Ne doivent pas aller à l'encontre des besoins
 - Besoin de connaître leur potentiel et leurs limites
 - *Ex : HMD vs. Cave vs Moniteur, 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

- 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

Exemples : Rééducation motrice post-AVC

17

Mindmotion Pro
de Mindmaze



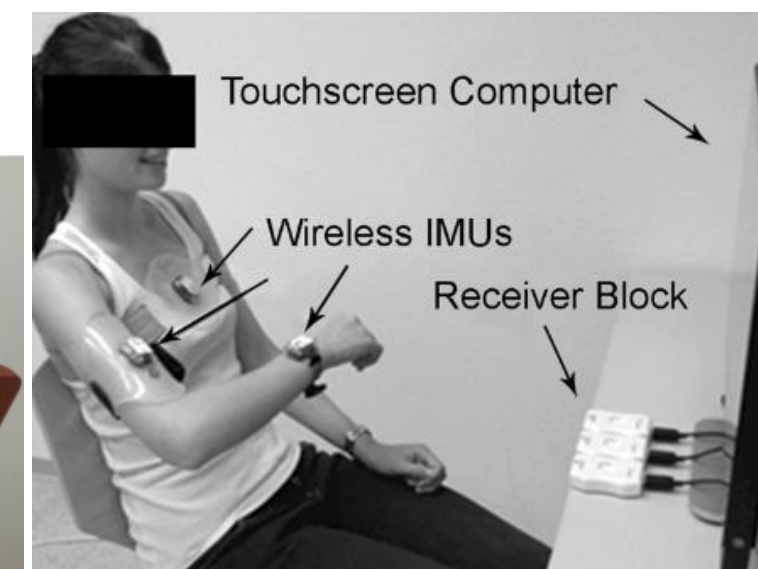
[Jang et al. 2005]



[Ma et Bechkoum 2008]



[Shin et al. 2014]



[Wittman et al. 2016]

Exemples : Rééducation du membre inférieur

18



Zebris 2018



ETH Zurich



Description générique

19

- 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



20

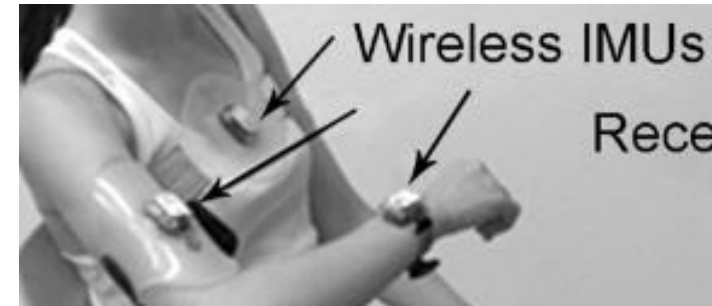


Technologies interactives

- 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...

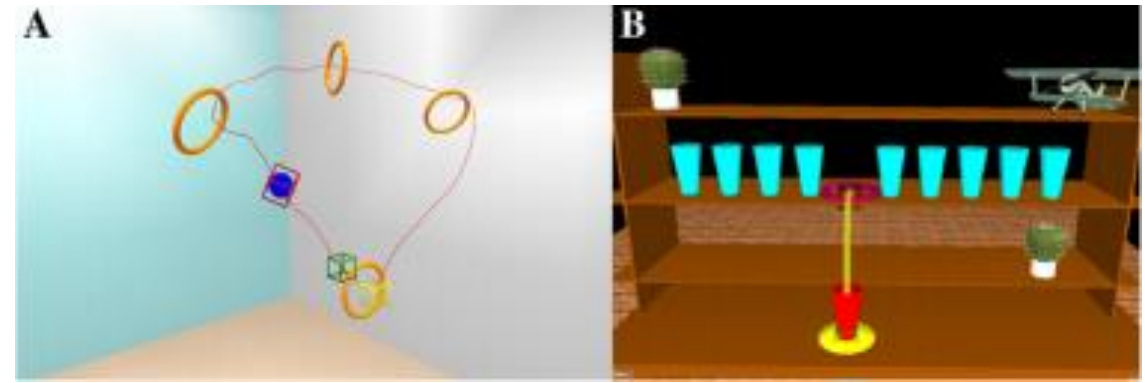


[Choi et al. 2014]



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]

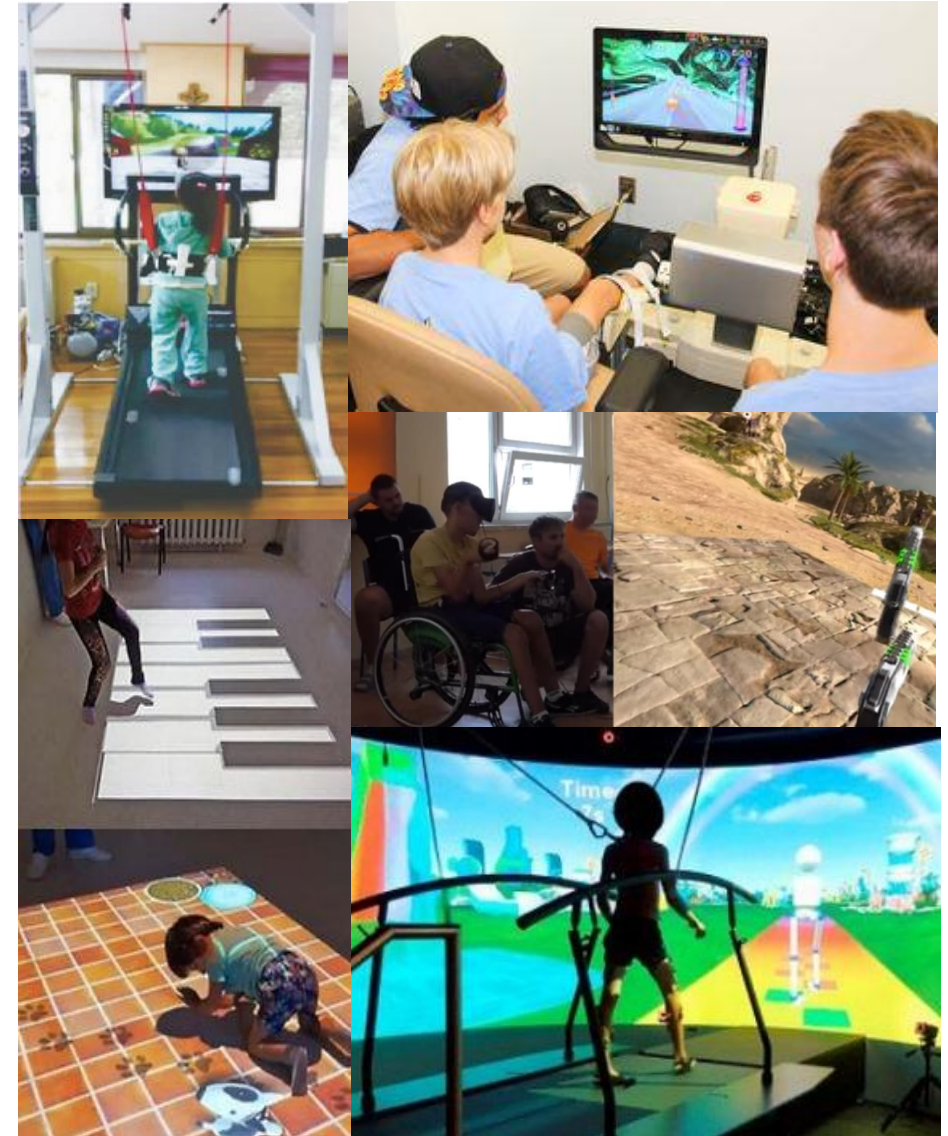
Tâches/Exercices/Jeux

23

- 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]



Extrait de (Demers, 2020)

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...
 - Export de bilans...



[Cameirao et al. 2016]



RGS (Eodyne)



Mesures et feedbacks

25

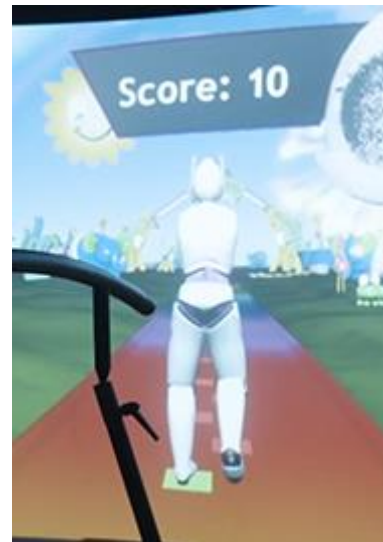
- Avatar
 - Vues variables du corps complet ou du membre concerné
 - 1^{ère} ou 3^{ème} personne
 - Objet ou personnage virtuel
 - Réaliste, simplifié, modifié



Evolv



Stevens Inst. Of tech (2021)



Motek



Hocoma



RGS

Paramètres et Coaching

26

- 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



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

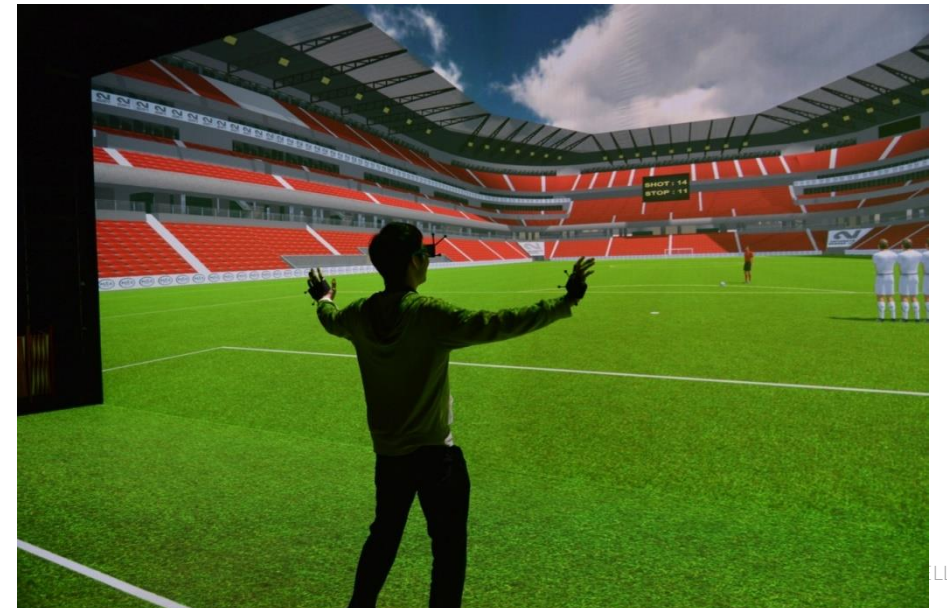


Nintendo Wii



CRVM, 2007

INRIA 2017



A person wearing a VR headset and a motion capture suit is standing in a room, gesturing with their right hand. The background shows a white door and a fire extinguisher.

RÉÉDUCATION MOTRICE À IBISC

RÉÉDUCATION POST-AVC DU MEMBRE SUPÉRIEUR



université
PARIS-SACLAY *ibiSc*



Région
Île de France
Projet cofinancé par le fonds
européen de développement régional.

Projet CESAAR-AVC (2016-2022)

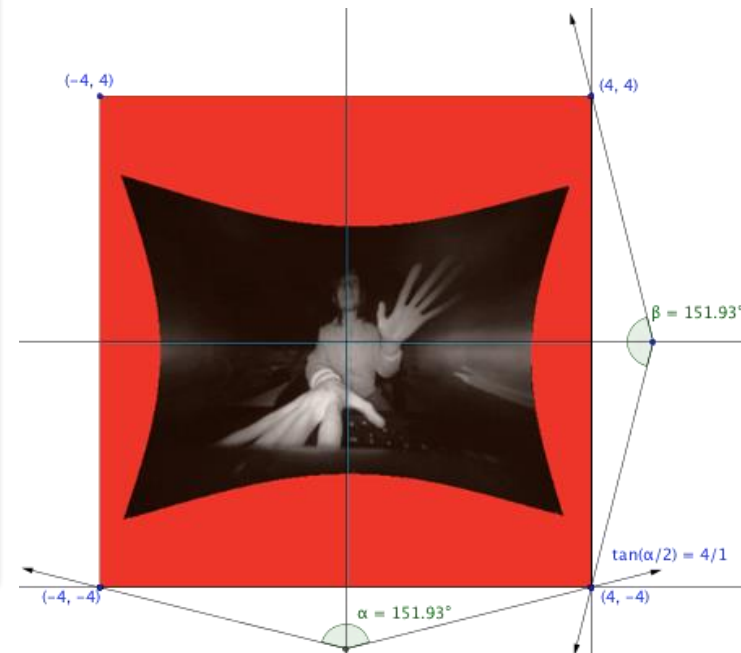
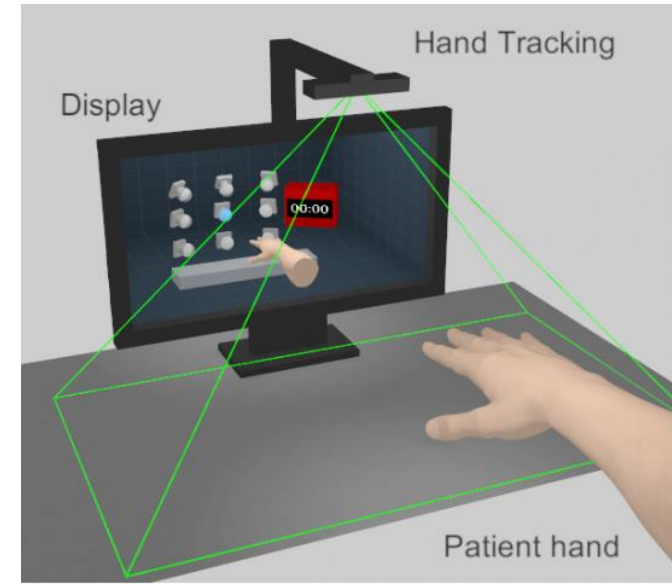
30



- 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

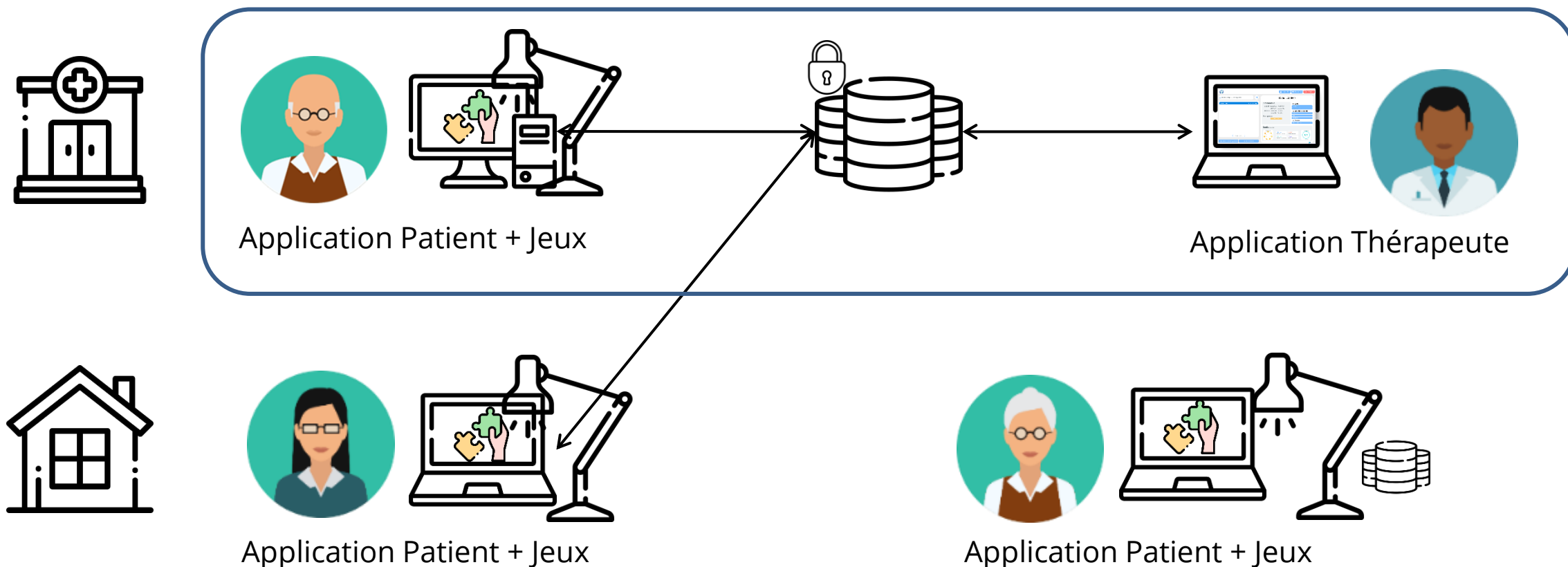
Dispositifs matériels

32



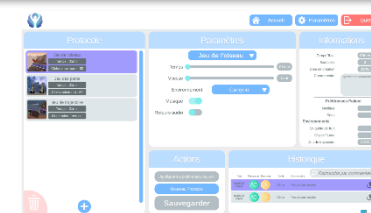
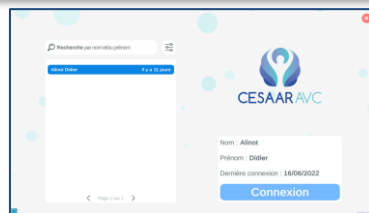
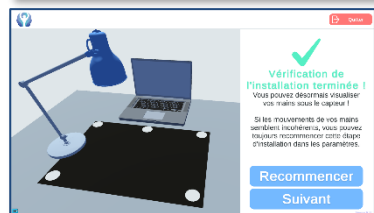
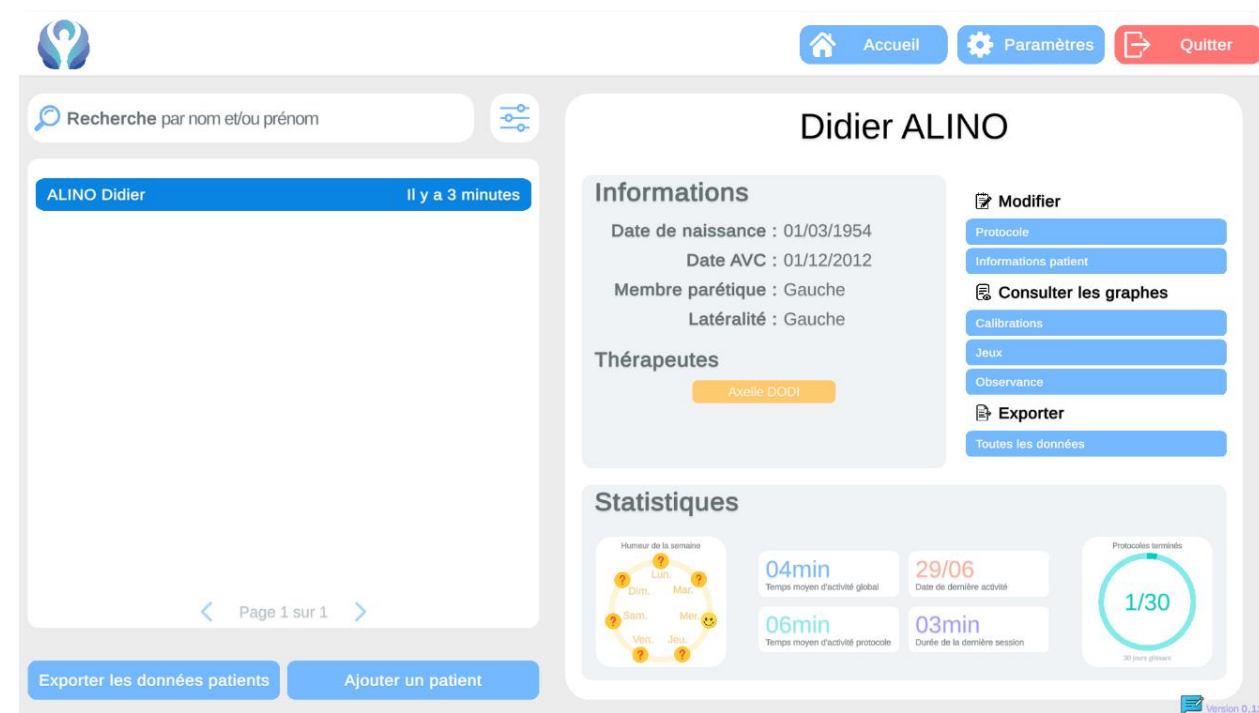
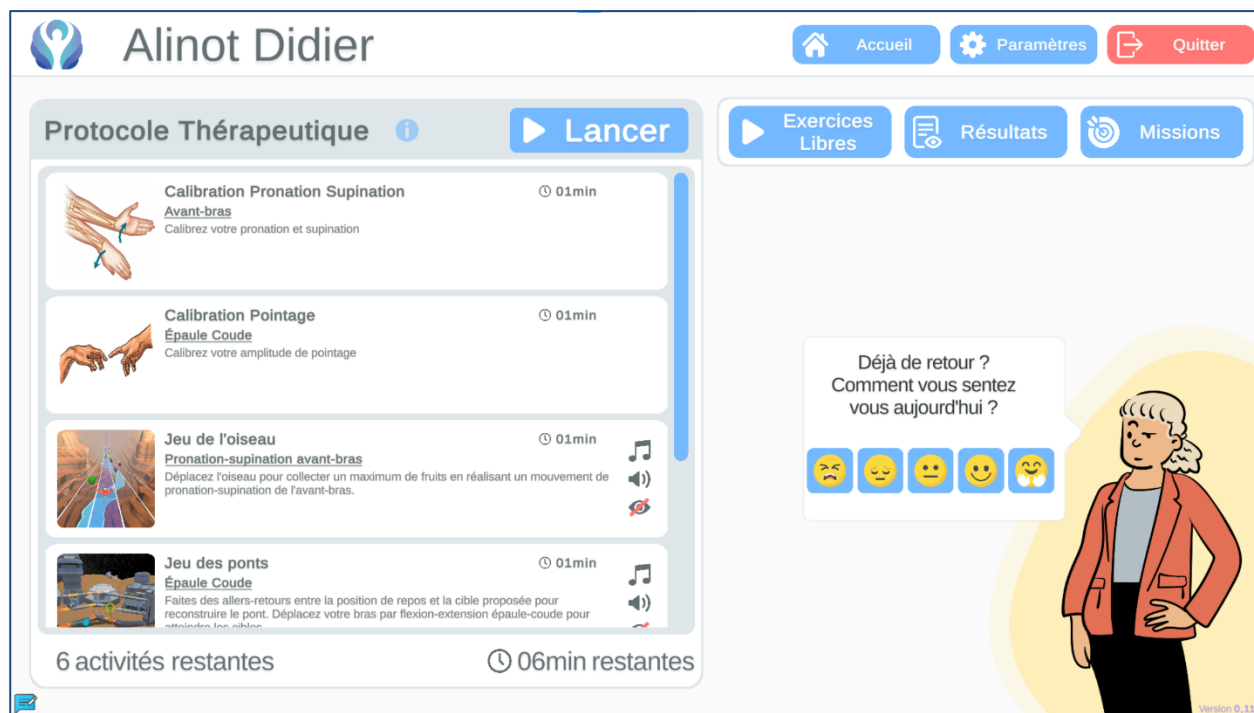
Principe d'utilisation

33



Deux applications : pour les patients et les thérapeutes

34



Patient

Thérapeute

3 Jeux

35



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



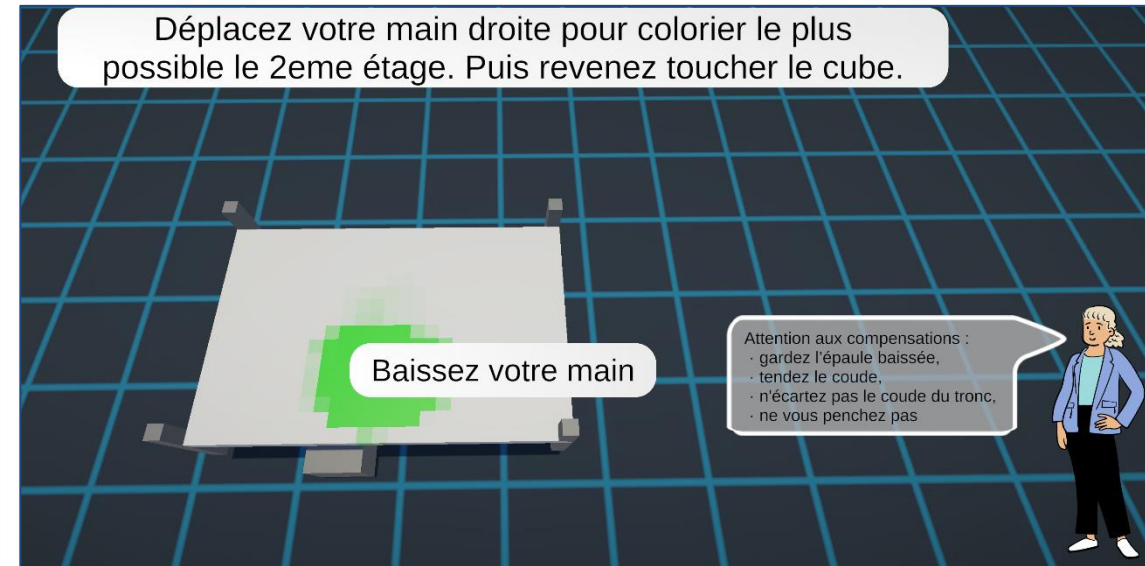
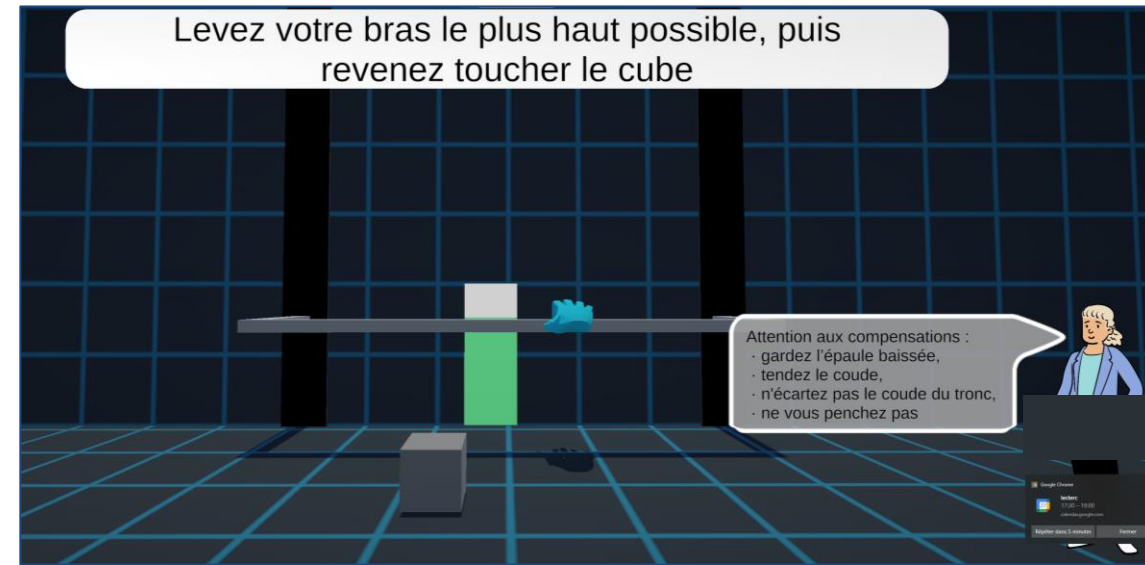
- Pointages de cibles
- Allers-retours répétés entre une zone de repos et des ponts à reconstruire



- 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



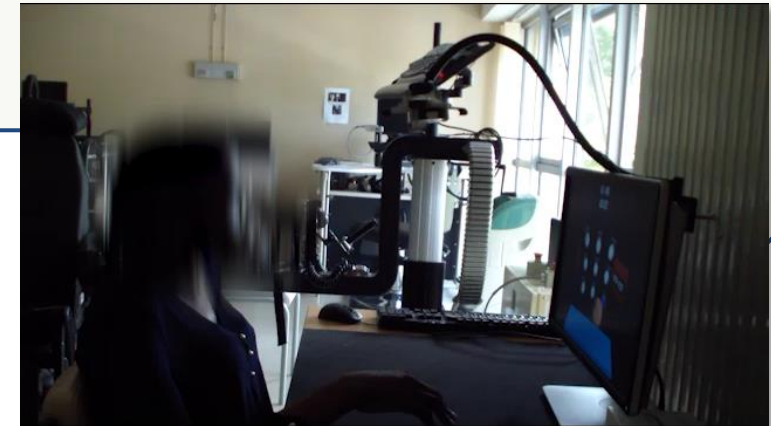
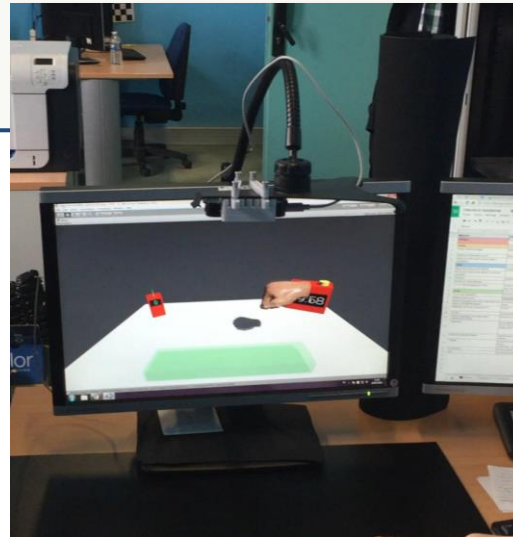
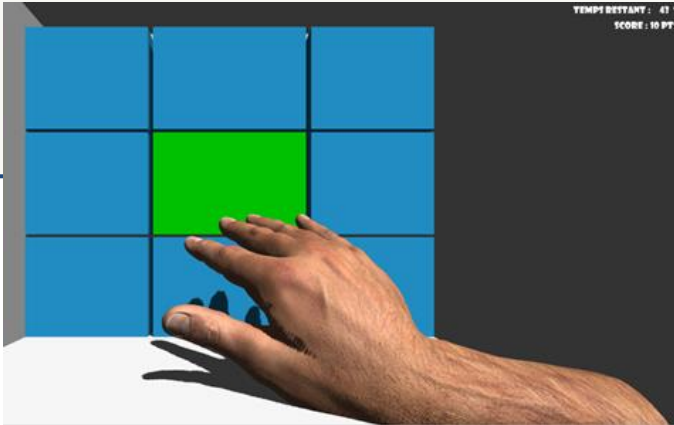
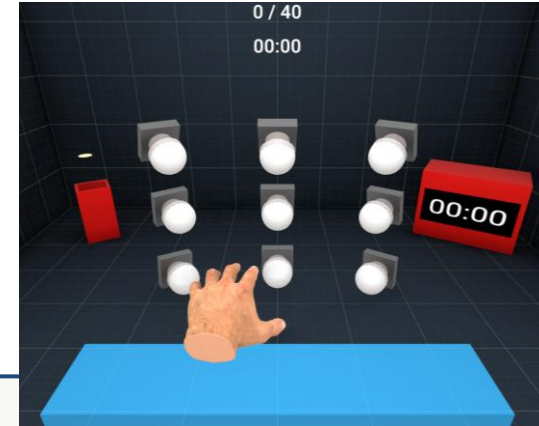
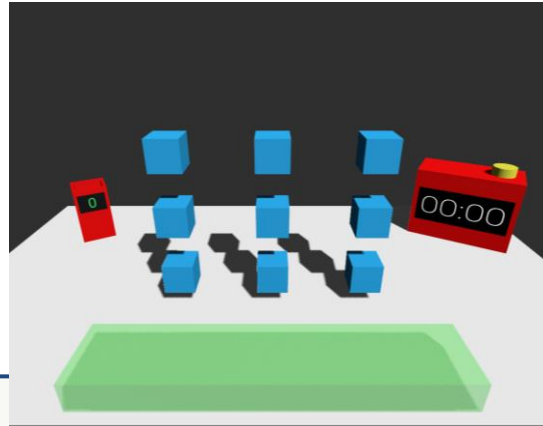
Angles de prono-supination

Amplitude de mouvement épaule-coude

Détails de conception

37

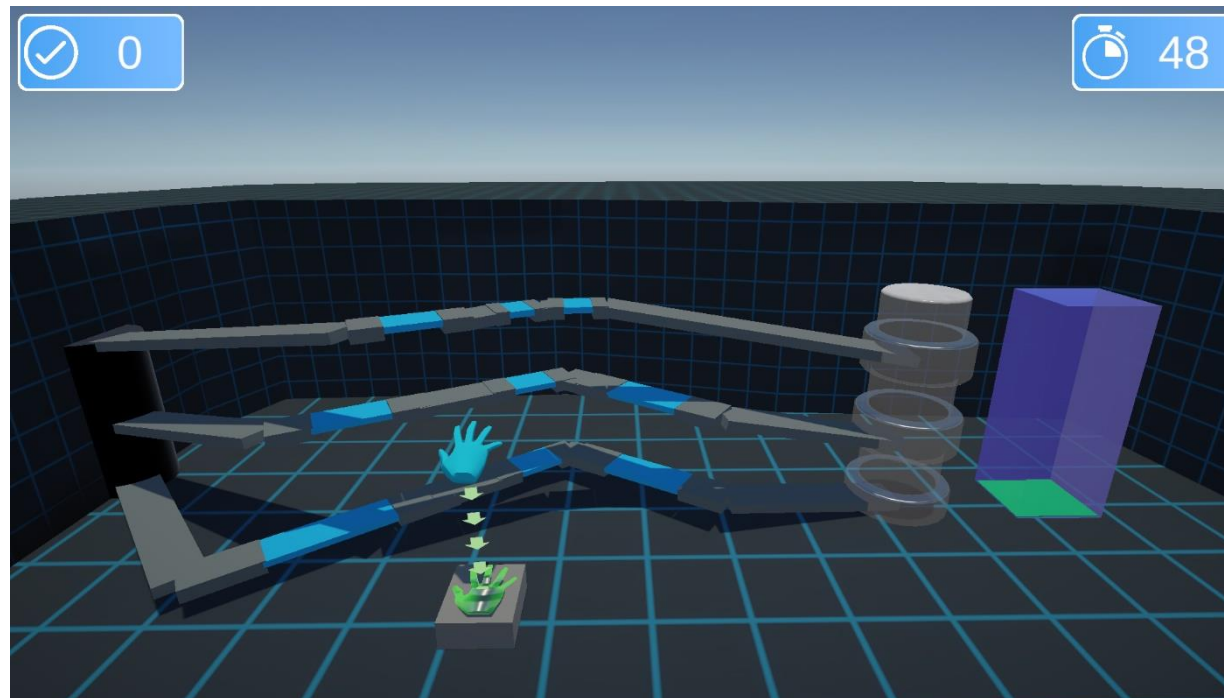
- Prototype du dispositif
- Mouvement et mécanique thérapeutique
- Avatar de main



Détails de conception

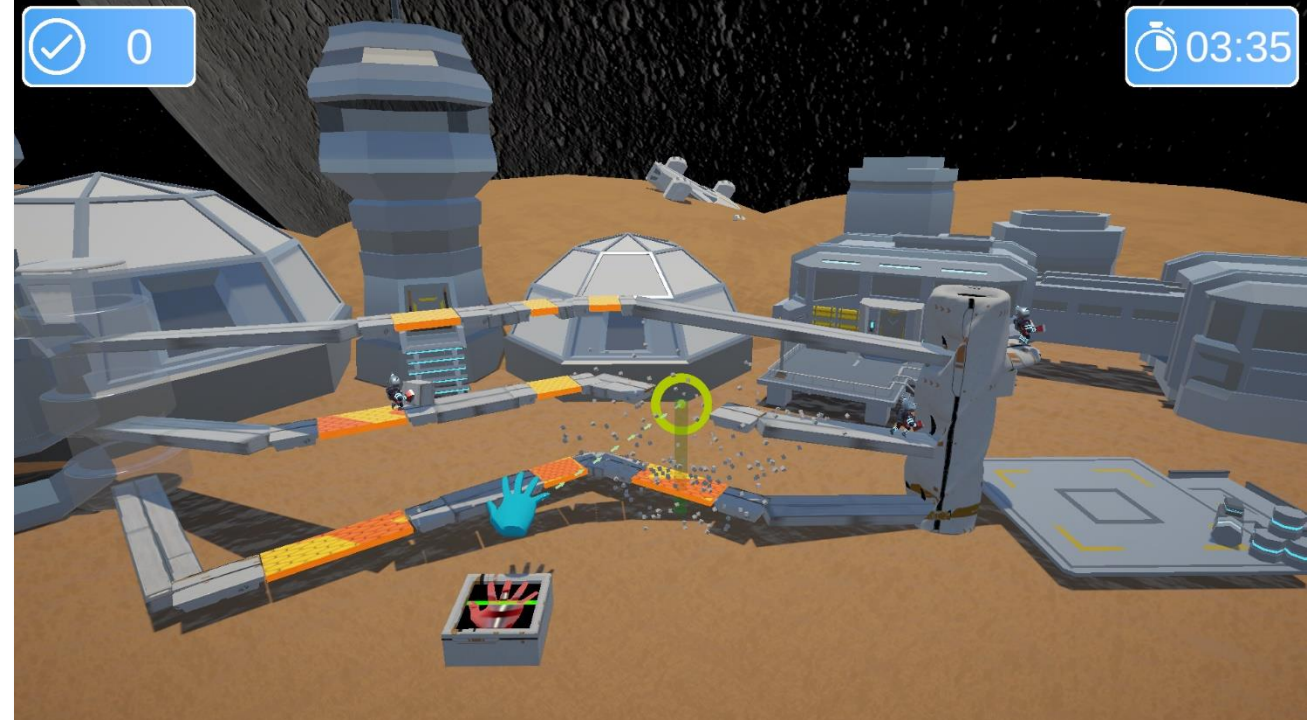
38

- 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

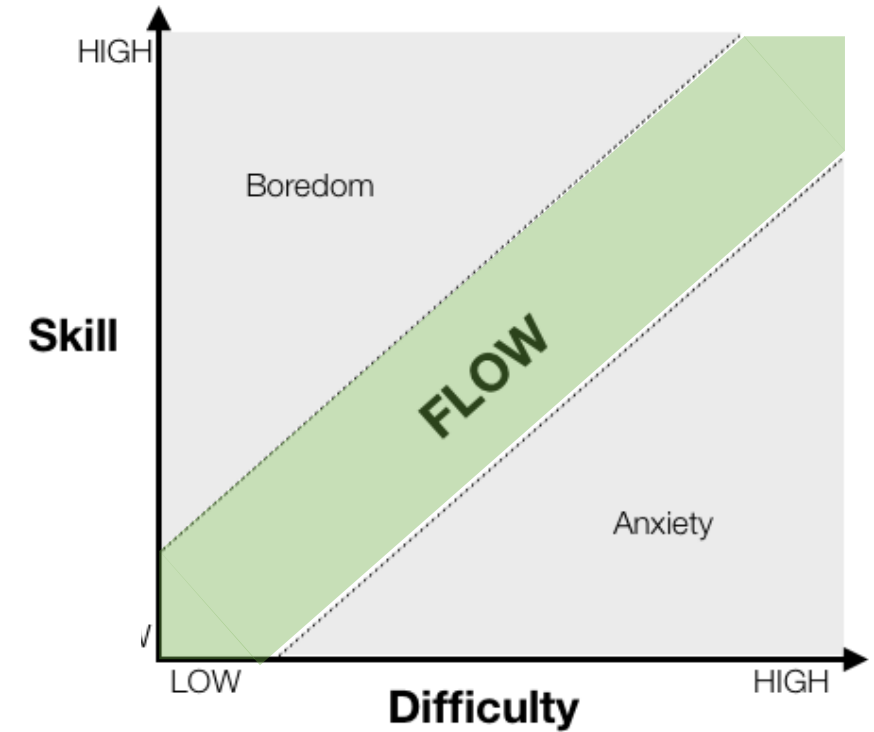
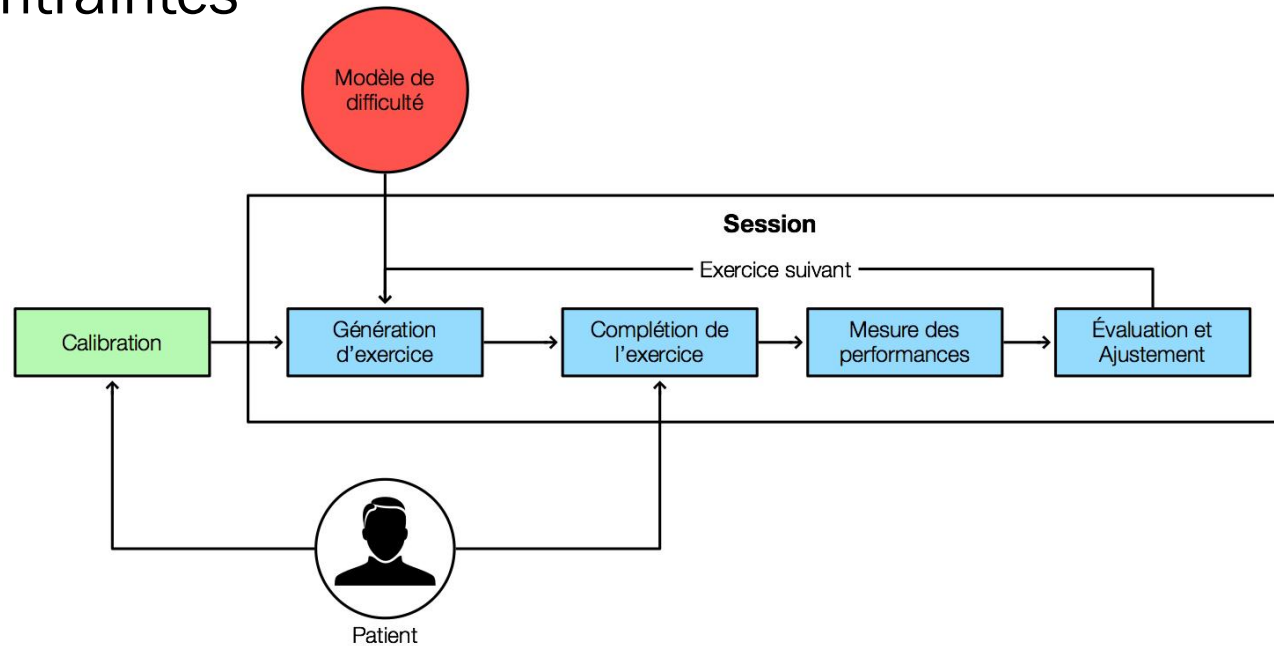
- 4 environnements visuels
 - 1 simple
 - Modèles, textures et animations 3D
 - Couleurs compréhensibles et visibles
- Interface utilisateur 2D (UI)
 - Ergonomie cognitive
 - Temps et score en jeu
 - Informations détaillées finales
 - "Coach"



Aspects motivationnels

41

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



Résultats préliminaires

42



- 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)

44



Présente :



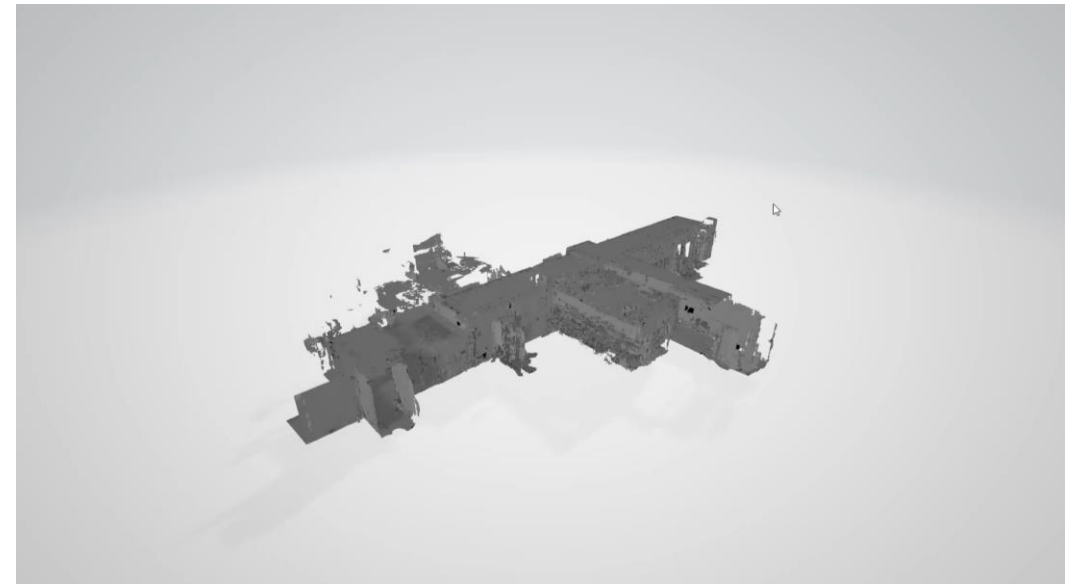
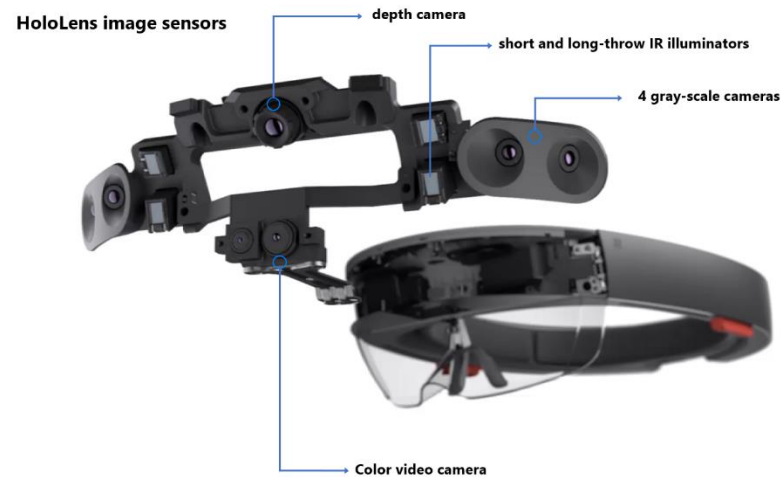
ARROWCP

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

47

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

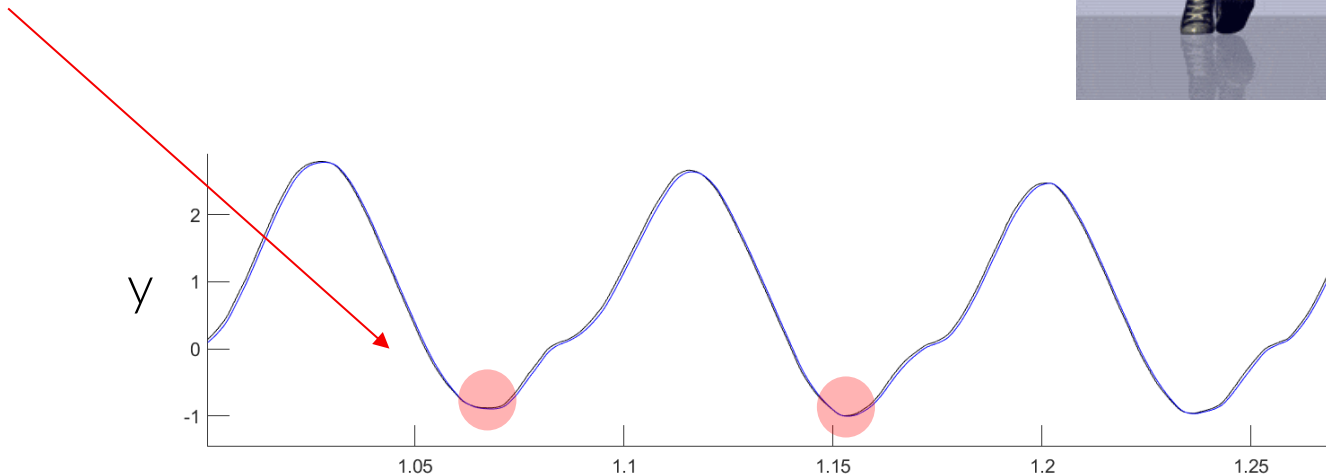
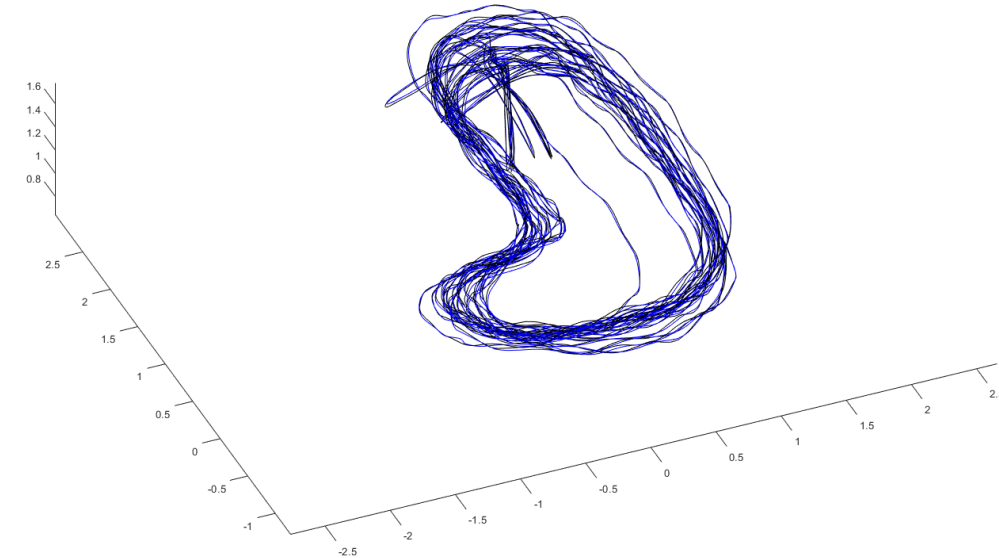
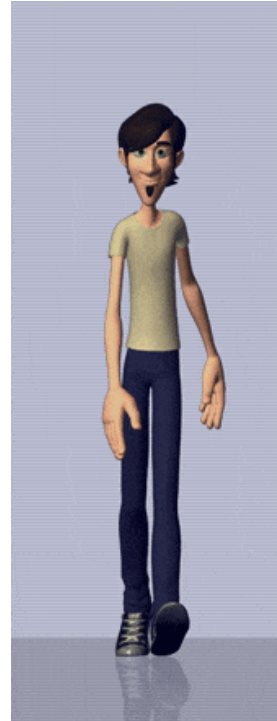


Guinet, A. L., Bouyer, G., Otmane, S., & Desailly, E. (2019). Reliability of the head tracking measured by Microsoft HoloLens during different walking conditions. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 22(sup1), S169–S171.

Mesures des performances de marche

48

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

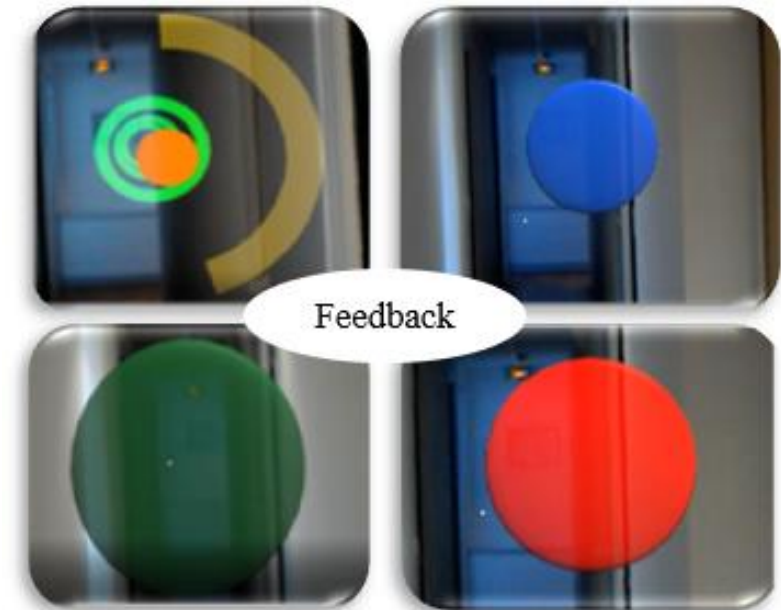
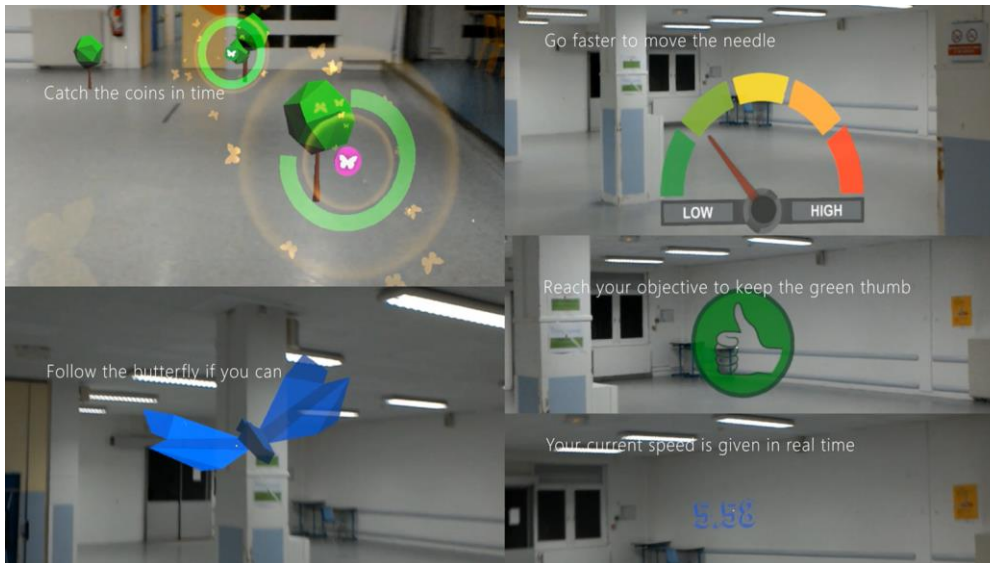


Guinet, A.-L., Bouyer, G., Otmane, S., & Desailly, E. (2021). Validity of Hololens Augmented Reality Head Mounted Display for Measuring Gait Parameters in Healthy Adults and Children with Cerebral Palsy. *Sensors*, 21(8), 2697

Processus de conception

49

- 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

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



50



Résultats préliminaires

51



- 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

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

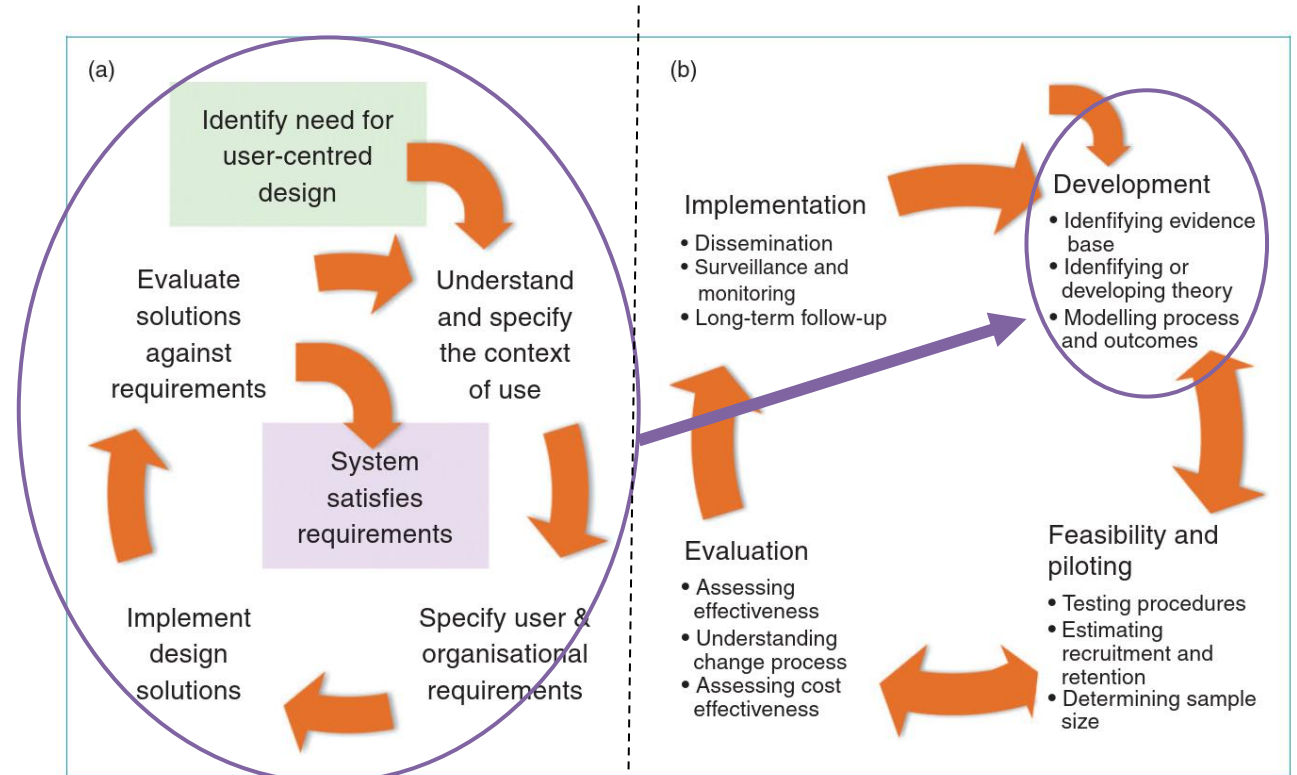
Défis du pluridisciplinaire IHM / Santé

54

- 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

55

- 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

56

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

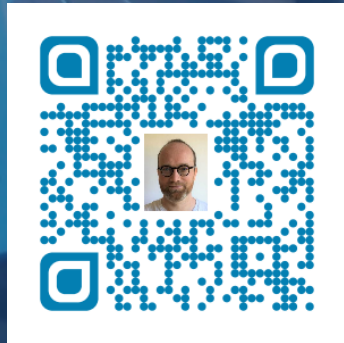
➔ Financement + Temps + Partenaire industriel

Références principales

57

- 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/



ensiie

