



**UQAC**

Université du Québec  
à Chicoutimi

**EXPLOITATION DE JOUETS CONNECTÉS DANS DES JEUX SÉRIEUX DE  
RÉADAPTATION**

**PAR ALEXANDRE ISABELLE**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI COMME  
EXIGENCE PARTIELLE EN VUE DE L'OBTENTION DU GRADE DE MAÎTRE ÈS  
SCIENCES EN INFORMATIQUE PROFIL RECHERCHE**

**QUÉBEC, CANADA**

**© ALEXANDRE ISABELLE, 2026**

## RÉSUMÉ

Dans le domaine de la rééducation pédiatrique, notamment auprès des enfants atteints d'hémiplégie congénitale, il demeure essentiel de concevoir des approches thérapeutiques à la fois efficaces, personnalisées et engageantes. L'hémiplégie, qui se manifeste par une paralysie partielle affectant un hémicorps, entraîne des limitations fonctionnelles majeures, en particulier au niveau du membre supérieur. Ces limitations nuisent à l'autonomie dans les gestes du quotidien, tels que la préhension, la manipulation ou le relâchement d'objets. Afin de compenser ces déficits, les programmes de rééducation traditionnels s'appuient sur la répétition de mouvements ciblés, dispensés au cours de séances de physiothérapie régulières. Cependant, si cette méthode demeure cliniquement validée, elle se heurte à une problématique de taille : le désengagement progressif des jeunes patients, confrontés à la monotonie et à la rigidité des exercices proposés.

Ce constat soulève ainsi la question centrale de cette recherche : comment rendre la rééducation motrice des enfants atteints d'hémiplégie plus attrayante, tout en maintenant les exigences thérapeutiques liées à la qualité des mouvements exécutés ?

Pour y répondre, cette étude propose d'explorer le potentiel des jeux sérieux comme levier de motivation et de personnalisation du parcours de réadaptation. Ces jeux, conçus pour intégrer des objectifs thérapeutiques au sein d'une expérience ludique, permettent de détourner l'attention du caractère répétitif des exercices en immergeant l'enfant dans un univers engageant. Plus spécifiquement, le projet vise à exploiter les fonctionnalités des jouets connectés LEGO Mario<sup>1</sup>, disponibles dans le commerce, qui intègrent divers capteurs capables de détecter les mouvements dans l'espace. L'enjeu consiste à développer un jeu sérieux thérapeutique adaptatif, capable de moduler automatiquement ses niveaux et son scénario en fonction de la qualité d'exécution des mouvements réalisés par l'enfant.

La démarche proposée repose sur trois axes complémentaires : la modélisation des exercices thérapeutiques intégrés à l'environnement virtuel afin d'en garantir la validité clinique, l'évaluation en temps réel des performances motrices à partir des données issues des capteurs embarqués, et l'adaptation dynamique du scénario de jeu visant à assurer une progression individualisée, valorisante et motivante, que ce soit en contexte supervisé ou autonome.

En réunissant rigueur thérapeutique et immersion ludique, ce projet ambitionne de transformer la rééducation en une aventure interactive, dans laquelle chaque progrès devient source de plaisir et de motivation durable.

---

1. [https://www.lego.com/en-ca/article/lego-super-mario-characters?icmp=TH-SHQL-Standard-themes\\_mario\\_about\\_ql\\_characters-TH-MAR-A09VCJ5SR8](https://www.lego.com/en-ca/article/lego-super-mario-characters?icmp=TH-SHQL-Standard-themes_mario_about_ql_characters-TH-MAR-A09VCJ5SR8)

## TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ</b> . . . . .	ii
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> . . . . .	v
<b>LISTE DES FIGURES</b> . . . . .	vi
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS</b> . . . . .	viii
<b>REMERCIEMENTS</b> . . . . .	ix
<b>AVANT-PROPOS</b> . . . . .	x
<b>INTRODUCTION</b> . . . . .	1
1.1 CONTEXTE . . . . .	1
1.2 PROBLÉMATIQUE . . . . .	2
1.3 QUESTION DE RECHERCHE . . . . .	4
1.4 STRUCTURE DU DOCUMENT . . . . .	5
<b>PRÉREQUIS</b> . . . . .	7
2.1 JOUET CONNECTÉ . . . . .	7
2.1.1 CAPTEUR EMBARQUÉ . . . . .	7
2.1.2 COMMUNICATION BLUETOOTH . . . . .	8
2.2 JEU SÉRIEUX . . . . .	8
2.3 DIFFICULTÉ . . . . .	10
<b>ÉTAT DE L'ART</b> . . . . .	12
3.1 CRITÈRE DE SÉLECTION . . . . .	12
3.2 CRITÈRE D'ANALYSE . . . . .	13
3.3 PRÉSENTATION DES TRAVAUX . . . . .	14
3.3.1 DYNAMIC DIFFICULTY ADJUSTMENT IN EXER-GAMES FOR REHABILITATION : A MIXED APPROACH . . . . .	14
3.3.2 DYNAMIC DIFFICULTY ADJUSTMENT IN A WHAC-A-MOLE LIKE GAME . . . . .	17

3.3.3	DYNAMIC DIFFICULTY ADJUSTMENT IN VIRTUAL REALITY APPLICATIONS FOR UPPER LIMB REHABILITATION . . . . .	19
3.3.4	FOCUS-DRIVEN AUGMENTED FEEDBACK : ENHANCING FOCUS AND MAINTAINING ENGAGEMENT IN UPPER LIMB VIRTUAL REALITY REHABILITATION . . . . .	21
3.3.5	HYPER-CASUAL ENDLESS GAME BASED DYNAMIC DIFFICULTY ADJUSTMENT SYSTEM FOR PLAYERS REPLAY ABILITY . . . . .	24
3.4	DISCUSSION . . . . .	27
3.5	CONCLUSION . . . . .	30
	<b>PROPOSITION . . . . .</b>	<b>33</b>
	<b>EXPÉRIMENTATION . . . . .</b>	<b>35</b>
5.1	PROTOCOLE . . . . .	35
5.1.1	ANALYSE ET INTÉGRATION DU JOUET CONNECTÉ LEGO MARIO	36
5.1.2	ÉLABORATION DES PROTOTYPES JOUABLES . . . . .	45
5.1.3	DIVERSIFICATION DES NIVEAUX . . . . .	50
5.1.4	RENFORCEMENT DE LA MOTIVATION . . . . .	53
5.1.5	MISE EN PLACE D'UN AJUSTEMENT DYNAMIQUE DE LA DIFFICULTÉ . . . . .	58
5.2	ÉVALUATION DU PROTOTYPE DE JEU . . . . .	64
	<b>DISCUSSION . . . . .</b>	<b>67</b>
	<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES . . . . .</b>	<b>69</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE . . . . .</b>	<b>72</b>

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 3.1 : ANALYSE DE L'ÉTAT DE L'ART . . . . .	28
TABLEAU 5.1 : INTERPRÉTATION DES DIFFÉRENTES DONNÉES TRANSI- TANT D'UN LEGO VERS L'AIGUILLEUR DANS UNREAL EN- GINE. . . . .	42
TABLEAU 5.2 : TABLEAU DES COULEURS RECONNUES ET LEUR CODE HEXADÉCIMAL . . . . .	43
TABLEAU 5.3 : TABLEAU DES DIFFÉRENTS PANTALONS ET LEUR CODE BINAIRE . . . . .	44
TABLEAU 5.4 : TABLEAU DES DIFFÉRENTES TUILES ET LEUR CODE HEXA- DÉCIMAL . . . . .	45

## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1 – APERÇU DES JOUETS LEGO MARIO . . . . .	3
FIGURE 3.1 – APERÇU DU JEU DÉVELOPPÉ PAR PEZZERA ET AL. POUR LA RÉHABILITATION UTILISANT UN TRANSFERT DE POIDS LATÉRALE POUR DÉPLACER HORIZONTALEMENT LE PERSONNAGE ET RÉCOLTER LES POMMES AVEC LE PANIER AVANT QU’ELLES TOUCHENT LE SOL, SANS RETIRER LES DEUX PIEDS DE LA BALANCE WII (COPYRIGHT © 2020, IEEE) . . . . .	15
FIGURE 3.2 – APERÇU DE L’ASSISTANTE VIRTUELLE (COPYRIGHT © 2020, IEEE). . . . .	16
FIGURE 3.3 – APERÇU DU JEU <i>BUG CATCHER</i> (COPYRIGHT © 2018, IEEE). . . . .	20
FIGURE 3.4 – REPRÉSENTATION DU JEU SANS FIN (COPYRIGHT © 2020, IEEE). . . . .	25
FIGURE 5.1 – SCHÉMA DES DIFFÉRENTES COUCHES DE CONNECTION ENTRE LES LEGO ET UNREAL ENGINE . . . . .	38
FIGURE 5.2 – INTERFACE DE CONNEXION SELON LES PERSONNAGES CONNECTÉS . . . . .	40
FIGURE 5.3 – PREMIER PROTOTYPE DE JEU NÉCESSITANT LA COLORATION DE DEUX PLAQUES DISTINCTES DE LA MÊME COULEUR . . . . .	46
FIGURE 5.4 – DEUXIÈME PROTOTYPE DE JEU NÉCESSITANT LA MISE SOUS PROTECTION D’UN PERSONNAGE ET LA FUITE DE L’AUTRE . . . . .	47
FIGURE 5.5 – TROISIÈME PROTOTYPE DE JEU NÉCESSITANT DE DÉPLACER LE BON LEGO SUR LA BRIQUE DE COULEUR CLIGNOTANTE. . . . .	49
FIGURE 5.6 – REPRÉSENTATION D’UN EXEMPLE DE DISPOSITION PHYSIQUE COMPRENANT DIFFÉRENTS TYPES DE MOUVEMENTS DANS DIFFÉRENTS ANGLES ET HAUTEURS . . . . .	51
FIGURE 5.7 – REPRÉSENTATION DE L’INTERFACE DÉVELOPPÉE POUR LA SÉLECTION DE NIVEAUX . . . . .	53
FIGURE 5.8 – REPRÉSENTATION D’UN PIXEL ART . . . . .	54

FIGURE 5.9 – REPRÉSENTATION EN JEU DE DIFFÉRENTES ÉTAPES DE PRO- GRESSION DU PIXEL ART. . . . .	56
FIGURE 5.10 – REPRÉSENTATION DE L’OUTIL PERMETTANT DE CORRIGER LES ARTÉFACTS ET CRÉER DES PIXELS ARTS . . . . .	58
FIGURE 5.11 – REPRÉSENTATION DE L’INTERFACE DE SÉLECTION DES DIF- FÉRENTS PROFILS. . . . .	60
FIGURE 5.12 – REPRÉSENTATION DE L’ALGORITHME DE CLASSIFICATION DES PERFORMANCES . . . . .	62
FIGURE 5.13 – REPRÉSENTATION GRAPHIQUE SUR TROIS PARTIES CONSÉ- CUTIVES OÙ LES VALEURS DE TEMPS CALCULÉ REPRÉSENTENT LE TEMPS D’EXPOSITION DE LA PROCHAINE PARTIE SELON LE TEMPS TOUCHÉ . . . . .	65

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

<b>BLE</b>	« <i>Bluetooth Low Energy</i> »
<b>JS</b>	jeux sérieux
<b>ADD</b>	ajustement dynamique de la difficulté
<b>BBT</b>	« <i>box and block test</i> » (test de la boîte et des blocs)
<b>RG</b>	« <i>Reach-to-Grasp</i> » (atteinte et saisir)
<b>IdO</b>	Internet des objets
<b>RV</b>	réalité virtuelle
<b>PNJ</b>	personnage non-joueur
<b>RACA</b>	retour augmenté conduit par l'attention
<b>DPR</b>	difficulté à progrès rapide

## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, Monsieur Yannick Francillette. Son accompagnement rigoureux, sa bienveillance et sa grande expertise m'ont été essentiels tout au long de ce parcours. Il a su me guider dans l'univers exigeant de la recherche, m'apporter des conseils précieux sur les pratiques méthodologiques, tout en respectant et en soutenant mes choix. Son encadrement a grandement contribué à la concrétisation de ce projet.

Je remercie également chaleureusement la Fondation Ellen Poidatz, qui a permis la mise en pratique du jeu développé dans le cadre de cette recherche et sa validation à travers des tests réalisés auprès de patients. Leur engagement a été fondamental pour donner une portée concrète et humaine à ce travail.

Mes remerciements vont aussi à Frédéric Muhla, pour nos rencontres hebdomadaires, ses retours pertinents et son suivi constant, qui ont largement contribué au bon développement de l'application. Un grand merci à Éric Desailly pour son regard critique, ses observations pertinentes et ses riches connaissances en recherche, qui m'ont permis d'affiner ma réflexion.

Enfin, je souhaite remercier du fond du cœur ma famille pour son soutien indéfectible tout au long de mes études. Une pensée toute particulière à ma copine, qui a su faire preuve d'une grande patience et d'une compréhension sans faille face à mes nombreuses journées cloîtrées dans mon bureau à travailler. Votre soutien moral a été une véritable source de force.

## AVANT-PROPOS

Ce mémoire est bien plus qu'un travail de recherche, il représente l'aboutissement d'un parcours personnel et professionnel profondément ancré dans mes convictions, mes expériences et mes passions.

Depuis mon enfance, les jeux vidéo ont occupé une place importante dans ma vie. Bien plus qu'un simple loisir, ils ont toujours été, à mes yeux, un formidable vecteur d'immersion, de motivation et de dépassement de soi. Cette passion s'est naturellement imposée comme un moteur dans le choix de mon sujet de recherche.

Mais c'est à la suite d'un accident du travail, et du long processus de rééducation qu'il a impliqué que j'ai pris conscience de la lourdeur psychologique et de la monotonie que peut représenter une réadaptation physique. Cette expérience m'a marqué, et a éveillé en moi le désir de contribuer à améliorer ce parcours de soins, en proposant une approche différente, plus engageante, plus motivante. Il m'est alors apparu évident de réunir mes compétences techniques et ma passion pour le jeu vidéo au service de la rééducation.

Fort d'une expertise approfondie sur Unreal Engine<sup>2</sup> et d'une aisance éprouvée avec les objets connectés, j'ai souhaité concevoir une application interactive qui transforme l'acte de se rééduquer en une expérience stimulante, dynamique et ludique. L'objectif n'était pas simplement de créer un jeu, mais d'en faire un véritable outil thérapeutique, capable de rendre le processus de rééducation moins long, moins répétitif, et surtout plus humain.

Ce mémoire est donc le reflet d'une volonté de bâtir un pont entre technologie, passion et bien-être, en mettant l'innovation au service de la santé.

---

2. <https://www.unrealengine.com/en-US>

# INTRODUCTION

## 1.1 CONTEXTE

L'évolution rapide des technologies embarquées au cours de la dernière décennie a profondément transformé notre rapport aux objets du quotidien. Selon une étude de Statista [1], plus de 15 milliards de dispositifs connectés étaient actifs dans le monde, un chiffre qui devrait dépasser les 29 milliards d'ici 2030. Ces appareils, souvent miniaturisés, portables et interactifs, trouvent désormais des applications dans des domaines variés, allant de la domotique à l'agriculture, en passant par l'automatisation et la santé [2]. Cette montée en popularité s'accompagne d'une exigence croissante en matière de connectivité, de fiabilité et d'autonomie énergétique.

Dans ce contexte, la technologie Bluetooth<sup>3</sup>, et plus spécifiquement sa déclinaison « *Bluetooth Low Energy* » (BLE), s'est imposée comme un standard incontournable. Conçu pour minimiser la consommation d'énergie tout en assurant des échanges de données efficaces, le BLE permet d'établir des communications stables entre objets connectés et appareils centraux tels que les ordinateurs ou les tablettes. L'avènement plus récent du « *Bluetooth Mesh* », quant à lui, ouvre des perspectives nouvelles. Il permet à plusieurs dispositifs de communiquer entre eux simultanément au sein d'un réseau maillé, favorisant ainsi une interaction fluide et distribuée entre plusieurs capteurs et unités connectées, à faibles coûts énergétiques [3].

---

3. <https://www.bluetooth.com/>

C'est dans ce cadre technologique que s'inscrit le jouet LEGO Mario<sup>4</sup>, un produit interactif commercialisé par LEGO<sup>5</sup> en partenariat avec Nintendo<sup>6</sup>. Doté de plusieurs capteurs embarqués – dont un accéléromètre, un gyroscope, un capteur de couleur et un détecteur de mouvement – ce personnage est conçu pour réagir aux manipulations physiques de l'utilisateur. Couplé à la connectivité BLE, il devient un vecteur d'interaction riche, capable de transmettre des informations précises sur les gestes réalisés dans l'espace. Cette capacité d'interfaçage temps réel ouvre la voie à des usages innovants, bien au-delà du simple jeu. La Figure 1.1 montre une photo de deux jouets LEGO Mario.

L'un de ces usages émerge dans le domaine de la rééducation motrice pédiatrique, en particulier chez les enfants atteints d'hémiplégie, une paralysie partielle affectant un seul côté du corps. Cette condition, qui touche environ un enfant sur 1 666 à la naissance [4], engendre des difficultés motrices majeures, notamment pour effectuer des gestes comme la saisie, la manipulation ou le relâchement d'objets [5]. Le traitement repose largement sur des exercices répétitifs de physiothérapie, souvent perçus comme monotones et peu engageants, surtout chez les jeunes patients. Pour contrer ce désintérêt, les chercheurs et les cliniciens s'intéressent de plus en plus à l'usage de jeux sérieux, des jeux numériques conçus dans un but thérapeutique, afin de transformer la rééducation en expérience interactive et motivante.

## 1.2 PROBLÉMATIQUE

Bien que des protocoles de rééducation tels que les exercices « *Reach-to-Grasp* » (atteinte et saisir) (RG) [6] ou les tests « *box and block test* » (test de la boîte et des blocs) (BBT) [7] soient largement reconnus pour leur efficacité clinique dans le développement de la motricité

---

4. <https://www.lego.com/fr-ca/product/adventures-with-interactive-lego-mario-71439>

5. <https://www.lego.com/fr-ca>

6. [www.nintendo.com](http://www.nintendo.com)



**FIGURE 1.1 : Aperçu des jouets LEGO Mario**

fine et globale des membres supérieurs, leur application reste confrontée à plusieurs limites dans un contexte pédiatrique. En particulier, la nature répétitive, peu interactive et faiblement contextualisée de ces tâches peut entraîner une baisse rapide de la motivation chez l'enfant, ce qui nuit à la régularité des séances et à l'efficacité globale du processus thérapeutique [8].

Par ailleurs, ces exercices sont souvent appliqués de manière uniforme, sans réelle adaptation à la performance individuelle en temps réel. Or, des travaux en sciences de la réadaptation suggèrent que le maintien d'un état motivationnel positif, proche de ce que la psychologie appelle « *flow* » [9], repose sur une gestion dynamique de la difficulté, ajustée continuellement au niveau de compétence et à la progression du patient. L'absence d'un tel mécanisme d'adaptation dans les exercices classiques limite non seulement leur engagement, mais aussi leur potentiel de personnalisation thérapeutique.

### **1.3 QUESTION DE RECHERCHE**

Face aux limites des approches traditionnelles de réadaptation motrice, comme les exercices RG ou les BBT [10, 11], souvent perçus comme monotones et peu stimulants par les jeunes patients, de nouvelles pistes sont explorées pour enrichir l'expérience thérapeutique. L'émergence de dispositifs interactifs, intégrant des capteurs embarqués et des environnements numériques adaptatifs, offre un potentiel prometteur pour renouveler la manière dont ces exercices sont proposés, mesurés et ajustés en temps réel. En particulier, l'exploitation d'objets connectés à des fins thérapeutiques soulève des questions quant à leur capacité à maintenir l'engagement des enfants, tout en respectant les objectifs cliniques des protocoles de rééducation.

Dans ce contexte, cette recherche s'articule autour de la question suivante :

**Comment une application thérapeutique interactive, s'appuyant sur les capteurs embarqués d'un jouet connecté LEGO Mario, pourra-t-elle adapter en temps réel la difficulté d'exercices moteurs inspirés de pratiques cliniques éprouvées, pour favoriser la motivation et l'adhésion des enfants atteints d'hémiplégie au processus de rééducation ?**

En s'appuyant sur les tendances récentes en matière de rééducation numérique, cette recherche ambitionne de contribuer à une meilleure compréhension du potentiel des jouets connectés dans des environnements ludiques, intelligents et centrés sur l'utilisateur, qu'ils soient utilisés de manière encadrée par un professionnel de santé ou en autonomie à domicile, avec une attention particulière portée aux besoins spécifiques des jeunes patients en réadaptation motrice.

#### **1.4 STRUCTURE DU DOCUMENT**

Le cadre de cette étude demeure exploratoire et expérimental. Il ne vise pas à proposer un protocole thérapeutique validé cliniquement, mais plutôt à démontrer la faisabilité technique et l'intérêt fonctionnel d'un tel dispositif dans un environnement virtuel développé sous Unreal Engine. L'approche adoptée combine une phase de recherche technologique (analyse des capteurs et de la connectivité), une phase de conception de jeu sérieux, et une phase de modélisation des gestes moteurs traduits en indicateurs exploitables dans une logique d'adaptation en temps réel.

Afin de répondre aux objectifs de cette recherche, le travail s'organise autour de plusieurs étapes complémentaires. La première phase du projet consiste à analyser le fonctionnement du jouet connecté LEGO Mario, en identifiant les types de capteurs intégrés (accéléromètre, capteur de couleur, capteur de position, etc.), ainsi que les données qu'ils permettent de collecter. Une attention particulière est portée à son protocole de communication sans fil, basé

sur le « *Bluetooth Low Energy* », et à la faisabilité de son exploitation dans un contexte interactif via le moteur Unreal Engine. À partir de cette analyse, une interface de communication est mise en place entre le jouet et l'environnement virtuel, permettant d'interpréter les signaux émis en temps réel. Cette étape implique la mise au point d'un prototype fonctionnel dans Unreal Engine, capable de réagir dynamiquement aux actions physiques effectuées avec le jouet. Une première phase exploratoire a été menée afin de concevoir trois scénarios de gameplay distincts, chacun visant à solliciter des mouvements moteurs pertinents pour la rééducation des membres supérieurs, en particulier dans le cadre de l'hémiplégie infantile. Ces prototypes, conçus pour intégrer des gestes spécifiques dans des interactions ludiques cohérentes, ont ensuite été présentés à une équipe de physiothérapeutes. Leur rôle a été de sélectionner, parmi les trois prototypes, celui jugé le plus pertinent sur le plan thérapeutique et le plus susceptible de favoriser une implication active des enfants dans le processus de rééducation. Le scénario retenu a été instrumenté de manière à extraire des données pertinentes issues des capteurs du dispositif LEGO Mario. L'évaluation motrice repose principalement sur l'analyse des temps de réaction et sur la validation des actions réalisées par le joueur, permettant de vérifier que les gestes attendus ont bien été exécutés sans erreur de manipulation. Ces données alimentent un système d'interprétation simplifié visant à établir un profil moteur évolutif, base du mécanisme d'adaptation progressive de la difficulté des exercices. En s'appuyant sur les performances recueillies, un système de progression adaptatif est développé, modifiant en temps réel la difficulté. Cette approche vise à maintenir l'enfant dans une zone optimale de défi, favorisant l'engagement et la répétition des exercices sans frustration. Enfin, une attention particulière est portée à l'expérience utilisateur globale, avec la mise en place de mécaniques de jeu favorisant la motivation intrinsèque, la diversité des défis et le sentiment de progression. L'objectif est de transformer l'exercice thérapeutique en une expérience de jeu plaisante, immersive et durable, pouvant être utilisée aussi bien dans un cadre supervisé que de manière autonome à domicile.

## **PRÉREQUIS**

### **2.1 JOUET CONNECTÉ**

Afin de situer clairement les fondements techniques sur lesquels repose cette étude, il est essentiel de définir les termes et concepts qui seront régulièrement employés tout au long du mémoire. L'objet central de cette recherche, à savoir LEGO Mario, s'inscrit dans la catégorie plus large de l'Internet des objets (IdO). Ce terme regroupe un ensemble de dispositifs intégrant des technologies numériques, de communication et de détection leur permettant d'interagir de manière autonome ou semi-autonome avec leur environnement ou avec l'utilisateur. Ils sont généralement dotés de capteurs embarqués, de microcontrôleurs, et d'un système de communication sans fil (souvent via Bluetooth, Wi-Fi ou autres protocoles) [12] permettant dans notre cas une interaction enrichie entre l'enfant et le jouet. Les jouets connectés sont capables de collecter, traiter et transmettre des données en temps réel, ouvrant la voie à une personnalisation de l'expérience d'usage, à la surveillance de comportements, ou encore à l'adaptation dynamique de scénarios interactifs. Leur usage dépasse désormais le seul domaine du divertissement, pour s'étendre à l'éducation, à la construction ou encore à celui de la santé [13].

#### **2.1.1 CAPTEUR EMBARQUÉ**

Un capteur embarqué est un composant intégré directement dans un dispositif mobile (souvent peu encombrant), capable de détecter et de mesurer une ou plusieurs caractéristiques physiques ou physiologiques (accélération, orientation, pression, mouvement, etc.). Dans le cas de LEGO Mario, plusieurs capteurs sont présents, notamment :

- Un accéléromètre [14] pour détecter les mouvements linéaires ;
- Un gyroscope [15] pour évaluer l'orientation ;
- Un capteur de luminosité et un capteur de couleur sous la base du personnage, utilisés pour interpréter les surfaces sur lesquelles il est posé (couleurs et codes-barres).

### 2.1.2 COMMUNICATION BLUETOOTH

La communication entre le jouet LEGO Mario et un autre dispositif, tel qu'un ordinateur ou une autre figurine de type LEGO Luigi, repose sur le protocole BLE. Ce protocole, conçu pour les objets à faible consommation énergétique, permet un échange efficace de données sur de courtes distances. Bien que le BLE limite le débit de transmission [16], il est parfaitement adapté à l'envoi d'informations discrètes comme les mouvements, les événements déclenchés ou les changements d'état du jouet.

Par ailleurs, des évolutions récentes de la norme « *Bluetooth* », telles que « *Bluetooth Mesh* », permettent à plusieurs appareils de communiquer ensemble au sein d'un réseau maillé [17], augmentant ainsi les possibilités d'interactions multicapteurs ou de scénarios distribués. Dans le cadre de cette recherche, ce type d'architecture permet notamment d'envisager des exercices bimanuels, en connectant plusieurs objets LEGO simultanément, tout en conservant une synchronisation précise des événements.

## 2.2 JEU SÉRIEUX

Le terme jeux sérieux (JS) désigne une application ludique dont l'objectif dépasse le simple divertissement [18]. Il s'agit d'un outil hybride, combinant les mécaniques, les dynamiques et les esthétiques propres au jeu vidéo avec des objectifs issus de domaines non ludiques, tels que la formation, la sensibilisation, la recherche, ou, dans le cas présent, la

rééducation fonctionnelle. Le jeu sérieux mobilise ainsi le potentiel immersif et engageant du jeu pour favoriser l'apprentissage ou le développement de compétences spécifiques. Le terme jeu sérieux a été utilisé pour la première fois en 1970 [19], où il désignait des jeux ayant des objectifs éducatifs, sociaux ou politiques, tout en conservant une forme ludique. Bien qu'à cette époque ces jeux n'étaient pas nécessairement numériques, cette publication marque l'une des premières tentatives de conceptualisation formelle de jeux conçus pour des finalités autres que le simple divertissement. Il s'est depuis largement diffusé dans d'autres domaines comme la psychologie, la gestion des risques ou la santé. Le tournant numérique des années 2000 a véritablement impulsé l'essor des jeux sérieux à travers l'émergence de jeux vidéo spécifiquement développés pour la formation, la santé, la défense ou le changement social. Une croissance exponentielle des travaux sur les jeux sérieux entre la fin des années 1990 et les années 2010 [20], couvrant des domaines aussi variés que l'éducation, la santé, la communication ou le patrimoine culturel. Ce renouveau numérique a consolidé les fondements conceptuels posés en 1970, en les dotant de capacités interactives et adaptatives propres au support digital. Le jeu sérieux repose généralement sur trois composantes fondamentales :

1. Objectif utilitaire clair : le jeu est conçu pour répondre à un besoin spécifique, dans le cas présent, améliorer la motricité des membres supérieurs chez l'enfant hémiplégique ;
2. Mécaniques de jeu engageantes : le joueur interagit avec un système structuré de règles, de défis et de récompenses, qui rendent l'expérience plaisante et motivante ;
3. Système de mesure des performances : le jeu sérieux intègre souvent un mécanisme de suivi ou d'évaluation, qui permet d'analyser les progrès de l'utilisateur ou l'atteinte des objectifs visés.

Dans le domaine de la rééducation, ces jeux se caractérisent par l'intégration d'exercices fonctionnels dans un environnement interactif, permettant aux patients d'exécuter des

mouvements répétitifs tout en étant plongés dans un contexte narratif ou ludique. L'utilisateur, souvent un patient, devient ainsi acteur de sa thérapie, ce qui favorise l'implication et la régularité des efforts, deux conditions cruciales pour la récupération fonctionnelle. L'usage des jeux sérieux dans la rééducation motrice repose sur plusieurs bénéfices documentés :

- Augmentation de la motivation grâce au caractère immersif de l'expérience [21];
- Répétition accrue des mouvements ciblés par l'atteinte d'objectifs définis par les règles de jeu [22], condition essentielle à l'efficacité de la rééducation neuromotrice;
- Retours en temps réel (rétroactions visuelles et auditives) favorisant la motivation [23];
- Personnalisation des scénarios thérapeutiques selon le profil et les progrès de chaque patient [24].

Ces caractéristiques permettent de répondre à certaines limites des méthodes classiques de réadaptation, telles que le RG et relâchement, ou le BBT, souvent perçues comme répétitives, peu interactives, et difficilement adaptables en temps réel à la progression individuelle du patient.

### **2.3 DIFFICULTÉ**

L'adaptation dynamique de la difficulté, ajustement dynamique de la difficulté (ADD) désigne un mécanisme algorithmique qui permet de modifier en temps réel les paramètres d'un jeu en fonction des performances ou de l'état du joueur. Cette approche est au cœur des préoccupations actuelles dans la conception de jeux sérieux, notamment dans un cadre thérapeutique, où l'équilibre entre effort requis et compétence perçue est essentiel à la motivation et à l'efficacité de l'entraînement. L'adaptation dynamique repose sur des principes issus de la psychologie cognitive et du design d'expérience utilisateur, notamment :

- Le concept de flow (expérience optimale), qui décrit un état mental optimal dans lequel la personne est pleinement engagée dans une tâche, avec un équilibre entre défi et compétence ;
- Les théories de l'apprentissage moteur [25], selon lesquelles la progression optimale repose sur des tâches ni trop faciles (sous-stimulation), ni trop difficiles (frustration ou découragement).

L'évaluation continue de la performance repose sur les données objectives issues des capteurs embarqués du jouet LEGO Mario, soit :

- Le temps de réaction entre stimulus et mouvement ;
- La disposition du niveau (l'amplitude, densité et latéralité) ;
- La fréquence et régularité des mouvements.

Ces indicateurs sont ensuite utilisés par des algorithmes ADD pour ajuster le scénario du jeu, les contraintes temporelles et la complexité des tâches. L'objectif est de proposer un défi constant, mais accessible, garantissant à l'enfant une sensation de progrès sans rupture de motivation.

## ÉTAT DE L'ART

Cette section présente un survol critique des travaux existants portant sur l'utilisation des technologies interactives, et plus particulièrement des jeux sérieux embarqués, dans le contexte de la rééducation motrice. Elle vise à dégager les approches, les méthodologies et les dispositifs ayant démontré un potentiel dans l'amélioration motrice, de la motivation et de l'engagement des patients.

L'objectif n'est pas d'exposer de manière exhaustive la littérature sur les jeux thérapeutiques ou la rééducation numérique, mais de faire ressortir les contributions qui s'inscrivent de façon rigoureuse dans le champ de ce mémoire, c'est-à-dire la conception d'un jeu thérapeutique adaptatif intégrant un jouet connecté, et destiné à l'entraînement des membres supérieurs chez l'enfant atteint d'hémiplégie.

### 3.1 CRITÈRE DE SÉLECTION

Les publications retenues dans cette revue ont été sélectionnées en fonction de leur pertinence thématique et méthodologique. Un effort particulier a été accordé à la sélection rigoureuse d'articles ayant moins de 10 ans afin d'être le plus près de la réalité actuelle. Une attention particulière a été portée aux recherches impliquant des enfants, ou plus largement des populations en situation de réadaptation physique, bien que ses deux caractéristiques ne soient pas complètement bloquantes. Les dispositifs étudiés devaient intégrer une composante interactive ou embarquée, comme les jeux sérieux, les capteurs inertiels, les objets connectés ou les systèmes de suivi du mouvement. Enfin, seuls les travaux s'appuyant sur une démarche scientifique rigoureuse ont été retenus, c'est-à-dire ceux présentant une modélisation

fonctionnelle du jeu ou de l'exercice thérapeutique et proposant une méthode de validation expérimentale ou clinique.

### **3.2 CRITÈRE D'ANALYSE**

Les travaux retenus ont ensuite été analysés selon plusieurs axes permettant une lecture transversale et comparative des approches. L'analyse s'est d'abord intéressée à l'objectif thérapeutique visé par chaque dispositif, qu'il s'agisse d'améliorer la coordination, la force musculaire, la précision des mouvements ou encore l'amplitude gestuelle. Le type de jeu ou d'activité numérique a également été examiné, qu'il s'agisse d'un jeu sérieux développé spécifiquement pour une population cible ou encore d'exercices gamifiés encadrés par des thérapeutes. L'étude des technologies de suivi ou d'interaction a permis de distinguer les systèmes s'appuyant sur des manettes, des capteurs, des caméras, ou des objets connectés. Une attention particulière a été accordée à la manière dont les niveaux de difficulté étaient gérés, que ce soit de façon statique, ajustée manuellement par le thérapeute, ou de manière adaptative en fonction des performances en temps réel. Enfin, les résultats mesurés, qu'ils soient d'ordre moteur (temps de réaction, précision, fréquence, etc.) ou motivationnel (engagement, adhésion, plaisir), ainsi que les limites rapportées dans chaque étude (telles que la rigidité du système, les contraintes d'utilisation ou les obstacles à l'accessibilité), ont été pris en compte pour établir une vue critique et nuancée.

### 3.3 PRÉSENTATION DES TRAVAUX

#### 3.3.1 DYNAMIC DIFFICULTY ADJUSTMENT IN EXER-GAMES FOR REHABILITATION : A MIXED APPROACH

Dans cet article, Pezzera et Borghese [26] introduisent une approche mixte novatrice de ADD appliquée aux jeux d'exercice destinés à la rééducation motrice. L'objectif principal est de maintenir l'engagement du patient tout en assurant une exécution correcte des mouvements thérapeutiques. Le système ajuste en temps réel la difficulté des exercices, en se basant non seulement sur la performance observée, mais aussi sur les capacités physiques actuelles du patient et son état émotionnel – deux facteurs clés dans la qualité de l'engagement thérapeutique.

La plateforme de rééducation développée dans le cadre de cette étude est destinée à un usage à domicile. Elle repose sur un ensemble de capteurs, incluant la caméra Orbbec Astra<sup>7</sup>, la Microsoft Kinect<sup>8</sup>, ainsi qu'une Wii Balance Board<sup>9</sup>, permettant un suivi tridimensionnel du mouvement et du transfert de poids. Le jeu conçu pour l'expérimentation met en scène un avatar contrôlé horizontalement par le déplacement du centre de gravité du joueur, lequel doit attraper des pommes tombant d'un arbre à l'aide d'un panier virtuel se trouvant sur la tête de l'avatar.

L'un des points faibles de l'article est l'absence de détails techniques sur les méthodes exactes de détection d'erreurs de mouvement et de gestion des interprétations erronées issues

---

7. <https://www.orbbec.com/products/structured-light-camera/astra-series/>

8. <https://azure.microsoft.com/en-us/products/kinect-dk>

9. [https://csassets.nintendo.com/noaext/image/private/t\\_KA\\_PDF/wiiBalanceBoard?\\_a=DATC1RAAZAA0](https://csassets.nintendo.com/noaext/image/private/t_KA_PDF/wiiBalanceBoard?_a=DATC1RAAZAA0)



**FIGURE 3.1 : Aperçu du jeu développé par Pezzera et al. pour la réhabilitation utilisant un transfert de poids latérale pour déplacer horizontalement le personnage et récolter les pommes avec le panier avant qu'elles touchent le sol, sans retirer les deux pieds de la balance Wii (Copyright © 2020, IEEE)**

de la triangulation des données capteurs. Néanmoins, l'analyse qualitative du gameplay permet de déduire certains cas typiques d'erreur, comme le retrait d'un pied de la balance.

L'adaptation de la difficulté repose sur une combinaison de données objectives et subjectives. D'un côté, les paramètres moteurs mesurés incluent l'amplitude du mouvement, la fréquence d'exécution, la précision (modélisée par la taille du panier virtuel), et la stabilité (calculée par l'oscillation directionnelle par rapport à la cible). De l'autre, un personnage non-joueur (PNJ) conversationnel empathique interagit avec l'utilisateur pour recueillir des informations sur son état émotionnel et physique du moment.



**FIGURE 3.2 : Aperçu de l'assistante virtuelle (Copyright © 2020, IEEE)**

Deux approches d'adaptation ont été testées : l'adaptation linéaire, qui ajuste les paramètres de manière proportionnelle aux mesures, et l'adaptation basée sur la logique floue, qui prend en compte l'incertitude inhérente aux états physiques et émotionnels. Les résultats montrent que l'activation conjointe de ces deux approches, avec des pondérations différentes, influence directement la qualité des mouvements réalisés. Une dominance de l'adaptation

linéaire a tendance à favoriser des comportements compensatoires ou une posture incorrecte tout en respectant les limites fixées par les thérapeutes pour éviter toute surcharge ou blessure, tandis qu'une pondération accrue de la logique floue améliore la qualité des mouvements, en favorisant une exécution plus naturelle et stable. Toutefois, une surexploitation de cette dernière peut conduire à une baisse du niveau de défi, rendant l'activité monotone et donc moins engageante.

Ce travail constitue une contribution significative dans le domaine de la réadaptation interactive, en démontrant que l'intégration d'une adaptation dynamique bien équilibrée dans un jeu sérieux peut non seulement améliorer l'implication du patient. Il fournit également des pistes méthodologiques importantes pour la modélisation de systèmes similaires dans des contextes technologiques différents, comme celui du jouet connecté LEGO Mario.

### **3.3.2 DYNAMIC DIFFICULTY ADJUSTMENT IN A WHAC-A-MOLE LIKE GAME**

Dans cet article, Garcia et al. [27] proposent une approche ADD appliquée à un jeu sérieux de type *Whac-A-Mole*, visant la rééducation motrice des membres supérieurs. L'objectif est d'adapter en temps réel la complexité des actions demandées aux capacités motrices et attentionnelles du joueur, dans le but de maintenir son engagement tout en assurant une progression thérapeutique.

Le système repose sur un algorithme évolutionniste qui ajuste deux paramètres principaux du jeu : la position d'apparition des taupes (en coordonnées X et Y) et le délai de réaction imparti. Ces ajustements sont calculés à partir des données de performance recueillies en jeu, incluant notamment le temps de réaction et la distance parcourue par le marteau virtuel pour frapper la taupe. Le modèle est conçu pour déterminer une zone d'apparition de la cible

qui reste atteignable dans les limites physiques mesurées chez l'utilisateur, assurant ainsi une expérience personnalisée.

Cinq profils utilisateurs ont été simulés afin de d'évaluer la robustesse de l'approche :

1. Bonne coordination horizontale / mauvaise coordination verticale ;
2. Bonne coordination verticale / mauvaise coordination horizontale ;
3. Mauvaise coordination dans les deux axes ;
4. Moyenne coordination dans les deux axes avec déficit d'attention ;
5. Bonne coordination dans les deux axes avec déficit d'attention.

Les résultats indiquent que le système parvient à maintenir un niveau de difficulté approprié malgré des variations dans la performance, qu'elles soient en amélioration ou en régression. Ce comportement adaptatif constitue un atout majeur, notamment dans le contexte de la rééducation où les progrès sont rarement linéaires.

Cependant, certaines limites doivent être soulignées. D'abord, l'approche n'a été testée que sur des profils simulés. Aucun essai n'a été mené auprès de patients réels. Cela empêche de valider concrètement l'impact thérapeutique du système sur des enfants en rééducation motrice, notamment sur l'évolution de leur amplitude, précision ou endurance.

De plus, la logique de l'algorithme consiste à produire en permanence un objectif atteignable en fonction du profil actuel de l'utilisateur. Si cela permet d'éviter l'échec et de réduire la frustration, cela soulève une problématique importante en réadaptation : sans incitation explicite à dépasser ses limites, le patient risque de stagner dans une zone de confort. Or, l'un des objectifs essentiels de la rééducation motrice est de favoriser la récupération progressive de l'amplitude et du contrôle musculaire en sollicitant les fonctions résiduelles de manière contrôlée, mais ambitieuse. En ce sens, l'algorithme gagnerait à intégrer une logique

de progression intentionnelle, visant à amener graduellement le patient à élargir ses capacités au-delà du niveau de confort actuel.

En somme, cette étude propose une bonne base technique pour un ADD centré sur les performances motrices, mais nécessiterait des ajustements ainsi qu'une validation clinique pour évaluer pleinement le potentiel applicable en contexte thérapeutique pédiatrique.

### **3.3.3 DYNAMIC DIFFICULTY ADJUSTMENT IN VIRTUAL REALITY APPLICATIONS FOR UPPER LIMB REHABILITATION**

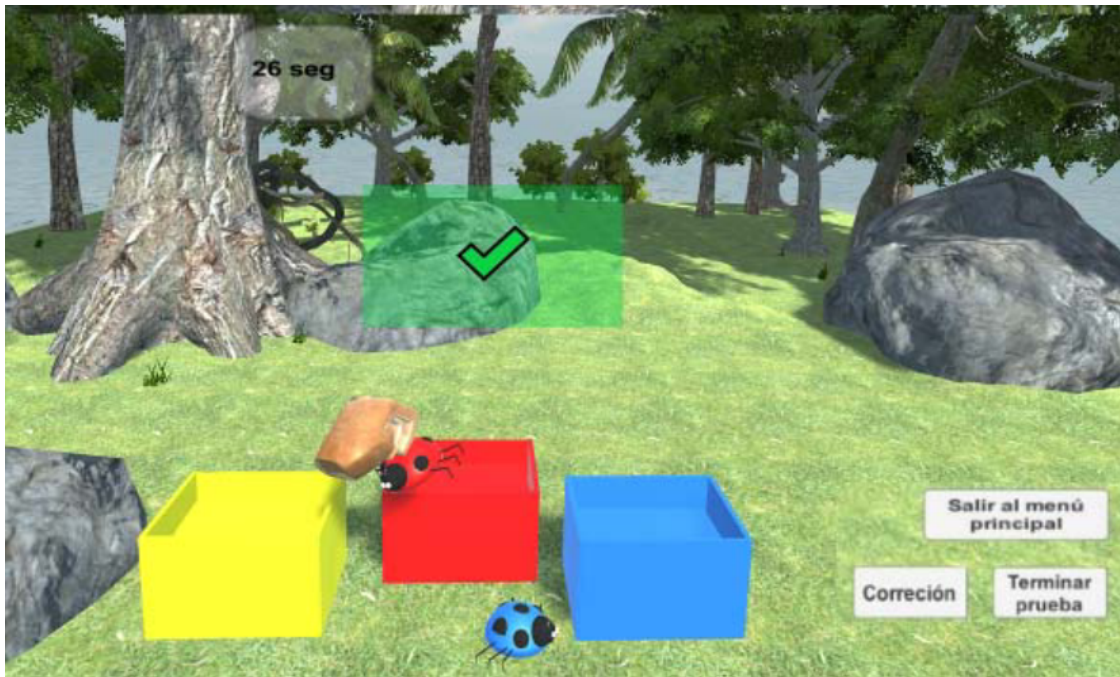
Dans cet article, Valencia et al. [28] proposent une approche ADD appliquée à un environnement de réalité virtuelle (RV) conçu pour soutenir la rééducation du membre supérieur. L'objectif est de moduler, en temps réel, le niveau de difficulté des exercices en fonction des capacités motrices de l'utilisateur, dans une perspective de rééducation personnalisée.

L'étude repose sur l'utilisation de Bug Catcher, un jeu développé à l'aide du moteur Unity 3D<sup>10</sup>, qui simule une version virtuelle du Box and Block Test (BBT) — un test clinique standardisé servant à évaluer la dextérité manuelle. Dans ce contexte, le jeu consiste à attraper des insectes virtuels et à les placer dans des boîtes de couleur correspondante. Les ajustements de difficulté sont réalisés sur plusieurs paramètres :

- Le temps d'apparition des insectes ;
- Leur capacité de déplacement (statiques ou mobiles) ;
- La profondeur des boîtes (avant-plan ou arrière-plan) ;
- La distance latérale entre les boîtes.

---

10. <https://unity.com/fr>



**FIGURE 3.3 : Aperçu du jeu *Bug Catcher* (Copyright © 2018, IEEE)**

Deux participants ont été recrutés, une jeune patiente de 18 ans présentant une hémiparésie gauche et un patient adulte de 37 ans atteint de monoparésie droite. Dans les deux cas, un seul membre supérieur était atteint, permettant d’impliquer les deux mains dans les exercices sans compromettre l’analyse fonctionnelle du membre affecté. Les séances étaient supervisées par un thérapeute afin d’éviter l’apparition de compensations motrices susceptibles de fausser les mouvements rééducatifs. Le protocole expérimental comprenait 20 séances réparties sur 4 semaines, à raison de cinq sessions hebdomadaires d’un peu plus de huit minutes chacune. Le BBT réel était réalisé avant, au milieu (11ème session) et à la fin (dernière session) afin d’obtenir une mesure clinique standardisée de la progression motrice. Parallèlement, un indice de performance était extrait du jeu Bug Catcher, basé sur le pourcentage d’insectes correctement placés dans les boîtes appropriées avant leur disparition. Ce score représentait ainsi la capacité du joueur à répondre avec précision et rapidité, sans inclure de notion d’échec au sens strict.

Le système de ADD implémenté dans le jeu repose sur une logique floue, capable d'ajuster automatiquement les paramètres de difficulté en fonction du rendement de l'utilisateur. Deux configurations ont été testées : l'une automatique, dans laquelle la difficulté évolue dynamiquement grâce à la logique floue ; l'autre manuelle, dans laquelle les ajustements sont réalisés par un professionnel de santé en fonction de son appréciation clinique.

Les résultats montrent que l'utilisateur exposé à la configuration automatique a présenté une amélioration constante de ses performances au cours des sessions, reflétée dans l'indice de performance du jeu ainsi que dans son score post-test au BBT. En comparaison, le participant en configuration manuelle a montré des gains moindres. Ces résultats suggèrent que l'adaptation dynamique de la difficulté peut contribuer à maintenir un niveau de défi optimal, potentiellement favorable à une meilleure implication et progression du patient.

Bien que les résultats préliminaires soient prometteurs, certaines limitations doivent être prises en compte. Tout d'abord, l'étude repose sur un échantillon très restreint de deux participants, ce qui limite la généralisation des conclusions.

### **3.3.4 FOCUS-DRIVEN AUGMENTED FEEDBACK : ENHANCING FOCUS AND MAINTAINING ENGAGEMENT IN UPPER LIMB VIRTUAL REALITY REHABILITATION**

Liao et al. [29] présentent le système « *Focus-Driven Augmented Feedback* » retour augmenté conduit par l'attention (RACA), une solution de rétroaction augmentée exploitant l'« *eye-tracking* » en temps réel pour optimiser la rééducation du membre supérieur en environnement immersif. L'objectif est de favoriser la concentration visuelle du patient sur les éléments clés de l'exercice, tout en maintenant un haut niveau d'engagement, facteur déterminant dans l'efficacité thérapeutique.

L'ensemble des expériences a été mené à l'aide du HTC Vive Pro Eye<sup>11</sup>, un casque de RV intégrant un oculomètre précis. Un jeu développé sous Unity 3D a été conçu pour simuler une tâche de rééducation basée sur l'adduction/abduction horizontale du bras. Le patient contrôle une petite voiture virtuelle qu'il déplace latéralement pour récupérer des pièces apparaissant selon une trajectoire sinusoïdale.

L'objectif principal du système de RACA est de moduler dynamiquement l'environnement de jeu afin de renforcer l'attention visuelle sur les éléments critiques de la tâche et de maintenir un niveau d'engagement élevé durant les séances de rééducation du membre supérieur. Cette approche repose sur l'orientation de l'attention vers des stimuli pertinents pour favoriser l'apprentissage moteur.

Pour ce faire, l'oculomètre du HTC Vive mesure en temps réel la direction du regard. Ces données sont utilisées pour classer les zones observées comme étant pertinentes, telles que la trajectoire des pièces ou la main virtuelle, ou non pertinentes, telles que le ciel ou le sol. Quatre types de rétroactions ont été identifiés dans l'article, et certains ont été utilisés pour moduler l'environnement de jeu :

- Visuel : rotation et brillance des pièces à collecter ainsi que des particules lors de la collecte ;
- Auditif : sons associés à la collecte ;
- Haptique : ne semble pas avoir été sujette à des modifications dans cet article ;
- Récompense : ne semble pas avoir été sujette à des modifications dans cet article.

---

11. <https://www.vive.com/sea/product/vive-pro-eye/overview/>

L'étude se compose de trois expérimentations successives. Les deux premières impliquent respectivement 35 et 36 adultes en santé, tandis que la troisième mobilise 17 patients en réadaptation. Tous les participants utilisent le dispositif de réalité virtuelle.

Chaque session débute par une phase de calibration motrice destinée à adapter la difficulté initiale à la capacité individuelle de l'utilisateur. Les niveaux de rétroaction augmentée testés varient de 0% à 75% dans l'étude 1, et de 0% à 50% dans les études 2 et 3. Les durées des essais sont de 60 secondes pour les participants sains, réduits à 30 secondes pour les autres patients afin de minimiser la fatigue. Entre les essais, des questionnaires autoadministrés sont utilisés pour évaluer plusieurs dimensions :

- Le taux de focalisation visuelle ;
- La performance ;
- La sensation d'être en contrôle ;
- Le sentiment d'engagement ;
- La facilité d'utilisation ;
- Une observation qualitative par des cliniciens.

Les résultats suggèrent qu'un niveau de rétroaction augmentée modéré, environ 20% chez les patients, permet d'atteindre un équilibre optimal entre concentration, performance et engagement. Au-delà de ce seuil, le focus rate commence à décroître, et les participants perçoivent une perte de contrôle sur l'action, malgré une amélioration continue de la performance brute.

Chez les adultes sains, ce même effet de plateau s'observe à partir de 40%. Les auteurs notent également que certains patients, notamment les plus âgés, rapportent un inconfort ou des effets de cybersickness lorsque les niveaux de rétroaction dépassent les 40%.

Enfin, les six thérapeutes impliqués dans l'étude valident le potentiel clinique du système, en particulier pour stimuler la motivation des patients. Ils soulignent toutefois que l'intensité de l'assistance doit être soigneusement calibrée, afin d'éviter que le retour augmenté n'interfère avec le sentiment de compétence ou l'auto-efficacité du patient.

### **3.3.5 HYPER-CASUAL ENDLESS GAME BASED DYNAMIC DIFFICULTY ADJUSTMENT SYSTEM FOR PLAYERS REPLAY ABILITY**

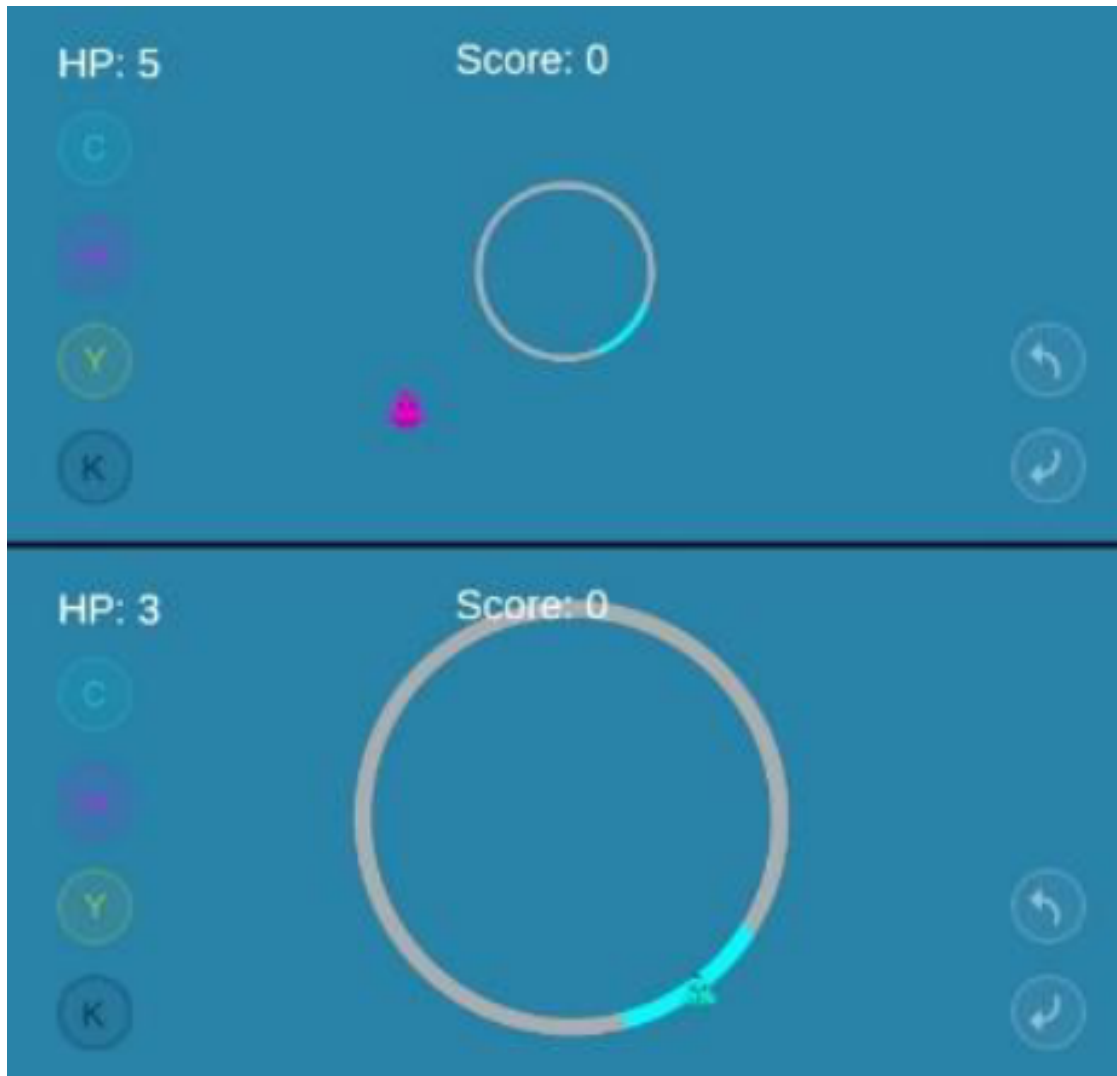
Dans cet article, Yang et Sun [30] explorent les mécanismes de ADD appliqués au genre spécifique des jeux « *hyper-casual* » à défilement infini, qui, bien que très populaires sur plateformes mobiles, souffrent généralement d'une faible rétention à moyen terme. Leur étude vise à améliorer la rejouabilité de ces jeux en adaptant la difficulté de manière fluide selon le niveau du joueur, afin de maximiser son engagement dans la boucle centrale de jeu (« *core loop* »).

Les jeux « *hyper-casual* » à défilement infini, comme *Flappy Bird* ou *Temple Run*, se caractérisent par leur simplicité mécanique, leur courte durée de session (3–5 minutes), et leur accès immédiat sans tutoriel complexe. Toutefois, ces qualités induisent une usure rapide de l'intérêt du joueur, dû à une progression limitée et à une difficulté non modulable. L'objectif des auteurs est de développer un système permettant aux joueurs de rester plus longtemps dans un état de « *flow* », c'est-à-dire un équilibre optimal entre défi et compétence perçue.

Le jeu prototype a été développé avec Unity 3D et comprend deux versions :

- Une avec un système de difficulté à progrès rapide (DPR) ;
- Une autre avec un système de ADD.

Dans les deux cas, le joueur contrôle un personnage qui doit éviter des obstacles circulaires se formant à l'écran. Chaque obstacle comporte une section colorée (Cyan, Magenta, Jaune ou Noir) et le joueur doit adapter la couleur de son personnage en appuyant sur le bouton correspondant et par la suite traversé l'obstacle dans la section de cette même couleur.



**FIGURE 3.4 : Représentation du jeu sans fin (Copyright © 2020, IEEE)**

Plusieurs paramètres ont été repérés pour ajuster la difficulté, pour des raisons de stabilité, seulement les éléments suivants ont été ajustés :

- La vitesse de déplacement des obstacles ;
- La vitesse de formation des obstacles ;
- La proportion colorée des obstacles ;
- La position de l'angle coloré.

Dans la version DPR, ces paramètres ne font qu'augmenter à mesure que le joueur atteint des paliers de score. En revanche, dans la version ADD, le système est bidirectionnel. Il augmente la difficulté si les performances sont stables, mais la réduit si des échecs répétés sont détectés.

Sept participants ont testé les deux versions (DPR et ADD), sans savoir qu'il s'agissait de deux configurations différentes. Le test comparait la durée de jeu, la performance, la frustration perçue, et le plaisir de jeu.

Les joueurs étaient divisés en deux groupes : joueurs expérimentés et joueurs occasionnels. Chacun commençait avec l'une des deux versions, puis passait à l'autre, et remplissait un questionnaire d'évaluation après chaque session.

- Les joueurs expérimentés ont obtenu de meilleurs scores avec la version ADD, mais ont exprimé une préférence pour la version DPR, jugée plus stimulante et gratifiante.
- Les joueurs occasionnels ont montré un engagement plus élevé avec le ADD, qui leur permettait de progresser sans décrochage. Leur frustration était nettement réduite, bien qu'ils aient parfois perçu le jeu comme moins intéressant.
- Une étude de cas spécifique illustre un effet paradoxal, bien que son expérience avec le ADD ait été plus performante et moins frustrante, elle a préféré le DPR, qui lui a donné l'impression de surmonter une vraie difficulté.

Les auteurs concluent que le ADD constitue une excellente base de tutoriel dynamique, mais que pour maximiser la rejouabilité, il devrait idéalement être combiné à un système de désactivation progressive, ou à une personnalisation de la difficulté selon le profil du joueur.

### **3.4 DISCUSSION**

Les cinq travaux analysés illustrent la diversité des approches en matière d'ajustement dynamique de la difficulté ADD appliqué au jeu sérieux, à la rééducation motrice, ou encore à l'engagement ludique général. Chacun propose une contribution spécifique au champ de la personnalisation de l'expérience interactive, avec des méthodologies contrastées, mais complémentaires.

**TABLEAU 3.1 : Analyse de l'état de l'art**

Article	Type de DDA	Population clinique	Dispositif de capture	Résultats
[26]	Logique floue et Adaptation linéaire	Sujet en santé	Caméra Orbbec Astra, Microsoft Kinect, Wii Balance	Encourage l'utilisation de ADD pour offrir un niveau de difficulté engageant, malgré la nécessité d'un certain contrôle par les thérapeutes
[27]	Algorithme évolutif	5 simulations de profil utilisateur différents	sans objet	Encourage l'utilisation de ADD pour offrir un niveau de difficulté engageant
[28]	Logique floue et Adaptation Manuelle	2 sujets ayant des troubles moteurs du membre supérieur	Leap Motion model LM-010	Encourage l'utilisation de la ADD pour offrir un niveau de difficulté engageant, sans mention nécessaire d'un contrôle par les thérapeutes
[29]	Ajustement Dynamique sans mention de la technique	71 sujets en santé et 17 sujets ayant des limitations	HTC Vive Eye Pro	Encourage l'intégration de rétroaction pour favoriser l'engagement
[30]	Ajustement Dynamique sans mention de la technique et Adaptation linéaire	Sujet en santé	Sans objet	Encourage la ADD, plus précisément pour des joueurs occasionnels

L'étude de Pezzera *et al.* sur un *exer-game*<sup>12</sup> de type attrape-fruit est la plus proche des standards cliniques en réadaptation motrice. Elle démontre qu'un système ADD fondé sur une analyse combinée des capacités physiques, des performances en jeu et de l'état émotionnel peut contribuer à maintenir un niveau de difficulté approprié au fil du temps. L'intégration d'un algorithme mixte combinant logique floue et ajustement linéaire est particulièrement pertinente. Toutefois, la faible transparence sur la détection des erreurs de mouvement, et l'absence de validation sur des patients réels. Ce travail éclaire néanmoins la nécessité d'un équilibre entre assistance et autonomie, enjeu fondamental que partage notre projet.

12. Un type de jeu qui implique de faire de l'activité physique pour progresser dans le jeu.

Le second article, porté par Garcia et Crocomo, explore un jeu de type *Whac-A-Mole* avec un algorithme évolutionniste modulant les coordonnées d'apparition des cibles. Ce système présente une approche innovante de la personnalisation en fonction du profil moteur spatial (horizontal/vertical), et simule plusieurs types d'utilisateurs. Si cette simulation valide la pertinence de l'approche algorithmique, elle reste dépourvue d'évaluation clinique, et n'intègre pas de logique de dépassement de soi, essentielle en rééducation. Néanmoins, l'idée de modéliser des capacités de réponse motrice sur des axes simples ouvre des perspectives très proches de celles mobilisables avec un objet connecté comme LEGO Mario.

L'étude de Valencia et al., à travers Bug Catcher, illustre un exemple de transposition directe d'un test clinique (BBT) dans un jeu sérieux adaptatif. L'intégration d'une logique floue pour moduler des éléments de complexité comme le temps d'apparition, la profondeur des boîtes et le mouvement des cibles sont directement comparables aux dynamiques que nous envisageons. Le protocole, bien que limité à deux patients, est complet, avec une supervision clinique, une mesure fonctionnelle BBT, et une structuration réaliste des sessions. La principale limite soulevée est la faible population clinique utilisée pour effectuer les manipulations sur une période relativement courte, il est donc difficile de généraliser les résultats.

Le travail de Liao et al. propose une approche originale centrée non pas sur la performance motrice brute, mais sur le focus attentionnel via l'« *eye-tracking* » RACA. En modulant la visibilité des rétroactions sensorielles selon que l'attention est dirigée vers la cible ou non, le système cherche à renforcer l'implication cognitive et à éviter la distraction. Bien que l'étude montre des résultats prometteurs (pic d'efficacité à 20% de rétroaction), l'assistance excessive diminue l'engagement et le contrôle des gestes effectués par les patients. Cette approche, bien que très technologique, met en lumière une dimension cruciale pour la rééducation des enfants : la capacité à maintenir la concentration sur des stimuli moteurs. Cette notion est directement transposable à l'univers LEGO, dans lequel les enfants peuvent facilement se

distraire. Intégrer des signaux simples permettant la compréhension rapide pourrait enrichir l'attention et favoriser une meilleure exécution des mouvements.

Enfin, l'article de Yang et Sun sur les jeux « *hyper-casual* » démontre que le ADD est également pertinent dans les jeux de très courte durée, avec des mécanismes simples. Leur étude, bien que non liée au contexte clinique, permet de comprendre les effets d'un ADD sur des joueurs occasionnels : tolérance accrue à l'échec, engagement plus long, réduction de la frustration. Ces constats sont transposables à un public pédiatrique en rééducation, qui partage certaines caractéristiques : sessions courtes, progression rapide, besoin de récompense immédiate. Leurs résultats suggèrent que la ADD génère des résultats positifs, mais qu'il faut tout de même faire attention à bien équilibrer les différents curseurs, rejoignant les constats des travaux cliniques précédents.

### **3.5 CONCLUSION**

L'analyse des travaux existants sur les systèmes d'ajustement dynamique de la difficulté ADD révèle une convergence importante sur leur potentiel à renforcer l'engagement, favoriser la progression personnalisée et maintenir l'intérêt thérapeutique ou ludique, notamment dans des contextes répétitifs ou exigeants. Toutefois, ces travaux présentent également des limites méthodologiques ou structurelles qui laissent entrevoir des marges d'innovation, notamment dans le cadre pédiatrique ciblé par ce mémoire.

Premièrement, bien que les approches varient, allant de la logique floue, à l'adaptation linéaire, en passant par des algorithmes évolutionnistes ou des ajustements manuels – l'ensemble des études concluent à la nécessité d'une adaptation en continu de la difficulté pour maintenir les utilisateurs dans un état de stimulation optimale. Cela étant dit, la question du contrôle thérapeutique émerge comme un point central. Plusieurs systèmes n'intègrent aucune

interface de validation ou de réglage manuel, tandis que d'autres insistent sur la nécessité d'un encadrement clinique pour éviter une adaptation inadéquate, qui peut compromettre l'objectif fonctionnel de la rééducation.

Deuxièmement, la population clinique visée dans ces études reste limitée. La majorité des participants sont des adultes en bonne santé, ou un nombre restreint de patients présentant des atteintes motrices diverses. Aucun des articles analysés ne s'intéresse spécifiquement à une population pédiatrique, ce qui constitue une lacune importante, tant en termes d'engagement que d'adaptation des interfaces et des rétroactions sensorielles. De plus, les enfants présentent des dynamiques attentionnelles, motivationnelles et motrices propres qui justifient une approche ciblée.

Troisièmement, l'analyse des dispositifs de capture met en évidence une certaine complexité technologique. Plusieurs systèmes combinent caméras 3D, capteurs de mouvement ou casque de RV, engendrant non seulement des coûts élevés, mais aussi un besoin de supervision technique importante. Certains dispositifs, comme les casques de RV ou la « *Wii Balance Board* », exposent les patients à des risques d'instabilité ou de nausée, et ne sont pas facilement transposables à un public pédiatrique. Le manque de simplicité d'usage représente donc une barrière à une adoption large dans des environnements non spécialisés.

Enfin, les résultats des études convergent sur deux éléments fondamentaux : d'une part, la ADD améliore significativement l'expérience utilisateur, qu'il s'agisse de performance ou de motivation ; d'autre part, l'intégration de rétroactions sensorielles adaptées est un levier reconnu pour renforcer l'engagement et favoriser un état d'immersion propice à l'apprentissage moteur. Cependant, les systèmes les plus efficaces semblent être ceux qui restent transparents, laissant au joueur la perception qu'il progresse par ses propres moyens.

Ces constats soutiennent pleinement la démarche entreprise dans le cadre de ce mémoire. En développant un jeu thérapeutique s'appuyant sur un jouet connecté commercial (LEGO Mario), accessible, tangible, et déjà familier aux enfants, et en l'intégrant à une structure logicielle (Unreal Engine) permettant la modulation dynamique des exercices, cette recherche propose une approche conciliant simplicité d'usage, rétroactions naturelles, et personnalisation clinique. Elle se positionne à l'intersection des contraintes techniques, cliniques et ludiques mises en lumière dans l'état de l'art, en visant une contribution à la fois pratique, évolutive et motivante, notamment pour les enfants en réadaptation motrice.

## PROPOSITION

À la lumière de l'état de l'art analysé, plusieurs constats convergents ont permis de dégager des principes directeurs pour la mise en place d'un dispositif interactif dédié à la rééducation motrice des enfants atteints d'hémiplégie. D'une part, l'intégration d'un ajustement dynamique de la difficulté ADD est reconnue, quel que soit l'algorithme sous-jacent, comme un levier fondamental de maintien de l'engagement et d'adaptation thérapeutique. D'autre part, la majorité des systèmes étudiés négligent l'inclusion d'une population pédiatrique, ou s'appuient sur des dispositifs complexes, coûteux ou difficiles à transposer dans un cadre rééducatif accessible.

Plutôt que de développer un système basé sur un algorithme complexe et opaque, le dispositif s'appuiera sur une logique de ADD mixte, construite à partir d'un ensemble de paramètres cliniquement pertinents, identifiés en concertation avec des professionnels en réadaptation pédiatrique. Ce choix fait écho aux conclusions de l'état de l'art, qui montrent que la nature exacte de l'algorithme est secondaire par rapport à la pertinence des variables ajustées et à la possibilité de contrôle partiel par le thérapeute. L'objectif est de permettre une adaptation des niveaux de difficulté en fonction de données simples, mais robustes : le temps de réaction ou la fréquence des erreurs.

Le LEGO Mario constitue un point d'ancrage physique, connu et apprécié des enfants, qui intègre nativement des capteurs embarqués (accéléromètre, gyroscope, capteur de couleur, capteur de position) exploitables dans un cadre thérapeutique. Son coût modeste, sa forme familière, et son potentiel de scénarisation ludique en font un support idéal pour dépasser la complexité technique et la répulsion potentielle des dispositifs plus médicaux. Le choix de

ce matériel répond ainsi à une triple exigence : simplicité d'usage, engagement spontané, et capacité à capturer des données motrices pertinentes sans appareillage intrusif.

Le projet s'inscrit spécifiquement dans un cadre de rééducation du membre supérieur chez des enfants hémiplésiques, population pour laquelle peu d'études ont proposé des dispositifs adaptatifs réellement personnalisés. Les exercices proposés seront directement inspirés de pratiques cliniques reconnues, puis traduits en mécaniques de jeu cohérentes. Le système visera à offrir une rééducation encadrée ou autonome, capable de s'adapter aux capacités fluctuantes des enfants sans générer de frustration.

Par cette proposition, le projet vise à concilier des exigences thérapeutiques et ludiques dans un cadre accessible, adaptable et engageant pour une population encore peu représentée dans les travaux actuels. Il s'agit à terme de démontrer qu'un objet connecté grand public, utilisé dans un cadre rigoureusement encadré, peut devenir un vecteur efficace de rééducation interactive pédiatrique, en s'appuyant sur des dynamiques adaptatives simples, et des rétroactions judicieusement choisies pour favoriser l'engagement.

Dans la continuité des approches visant à favoriser l'engagement, cette proposition s'appuiera sur des rétroactions soigneusement sélectionnées selon les principes fondamentaux de la conception ludique : un renforcement positif explicite, une esthétique attrayante, et une cohérence marquée entre l'action effectuée et la récompense perçue. Ces rétroactions seront conçues comme des repères stables qui valorisent les efforts du joueur, renforcent l'habitude d'interagir avec le système, et soutiennent l'expérience thérapeutique dans la durée. En somme, ils seront mobilisés comme des éléments clés du design expérientiel, spécifiquement choisis pour encourager l'adhésion de l'enfant aux tâches proposées et favoriser une répétition régulière de l'effort moteur, que ce soit en contexte autonome ou sous supervision.

# EXPÉRIMENTATION

## 5.1 PROTOCOLE

La première phase a consisté en une analyse technique approfondie du jouet connecté LEGO Mario, de ses capacités de captation (accéléromètre, gyroscope, capteur de couleur, etc.) et de son potentiel de connexion Bluetooth à un poste de travail. Cette phase s'est accompagnée de la mise en place de trois prototypes de jeux thérapeutiques sous Unreal Engine 5, chacun explorant un type d'interaction motrice différent (visée, coordination, réponse à stimulus). Ces prototypes ont permis de tester progressivement l'intégration du jouet dans des contextes de plus en plus proches de ceux d'une séance de rééducation pédiatrique réelle.

Une seconde phase a ensuite mobilisé une méthodologie de développement participatif, impliquant quatre chercheurs (issus des domaines de l'interaction personne-machine, de la réadaptation et de l'informatique), trois ergothérapeutes, deux physiothérapeutes et 18 enfants âgés de 4 à 17 ans présentant diverses atteintes motrices, principalement liées à l'hémiplégie. Ce processus collaboratif a permis d'identifier les besoins fonctionnels, de valider les objectifs thérapeutiques et d'ajuster les mécaniques de jeu afin d'atteindre nos objectifs thérapeutiques.

Les expérimentations ont été menées à l'aide d'un poste de travail doté d'un processeur multicœur (au minimum huit cœurs), d'une mémoire vive de 32 Go et d'une interface Bluetooth compatible. Le matériel utilisé comprenait deux figurines LEGO, soit LEGO Mario et LEGO Luigi. Le système de jeu a été développé au sein de l'environnement Unreal Engine 5. Cette configuration a permis d'assurer la gestion parallèle des flux capteurs, une stabilité d'exécution, ainsi qu'une expérience utilisateur fluide pour les enfants participants et les thérapeutes encadrants.

### 5.1.1 ANALYSE ET INTÉGRATION DU JOUET CONNECTÉ LEGO MARIO

Le choix du LEGO Mario comme dispositif central du projet repose sur plusieurs avantages : sa familiarité auprès des enfants, sa forme manipulable et rassurante, ainsi que la présence de capteurs embarqués permettant la captation de données motrices de manière simple et non intrusive. Le module Mario est en effet équipé d'un accéléromètre, d'un capteur de couleur, ainsi que d'un module BLE.

Afin d'exploiter ces capteurs dans un environnement interactif, le projet s'est appuyé sur deux bibliothèques « *open source* » existantes :

- pyLegoMario<sup>13</sup>, qui fournit une interface en Python pour établir la connexion BLE avec le jouet, lire les données brutes des capteurs, et interpréter certains événements natifs (tels que la reconnaissance de motifs couleur, l'inclinaison ou les sons joués) ;
- LEGO-Mario-Reveng<sup>14</sup>, qui documente la structure de communication BLE propriétaire du LEGO Mario, et a permis d'approfondir la compréhension des paquets de données échangées, nécessaires à la personnalisation de la couche d'intégration.

À partir de ces fondations, une application exécutée indépendamment du moteur Unreal Engine a été développée. Cette application assure les fonctions suivantes :

- Connexion Bluetooth au LEGO Mario au lancement du programme via l'interface pyLegoMario ;
- Lecture en continu des données de capteurs exposées via l'interface pyLegoMario ;

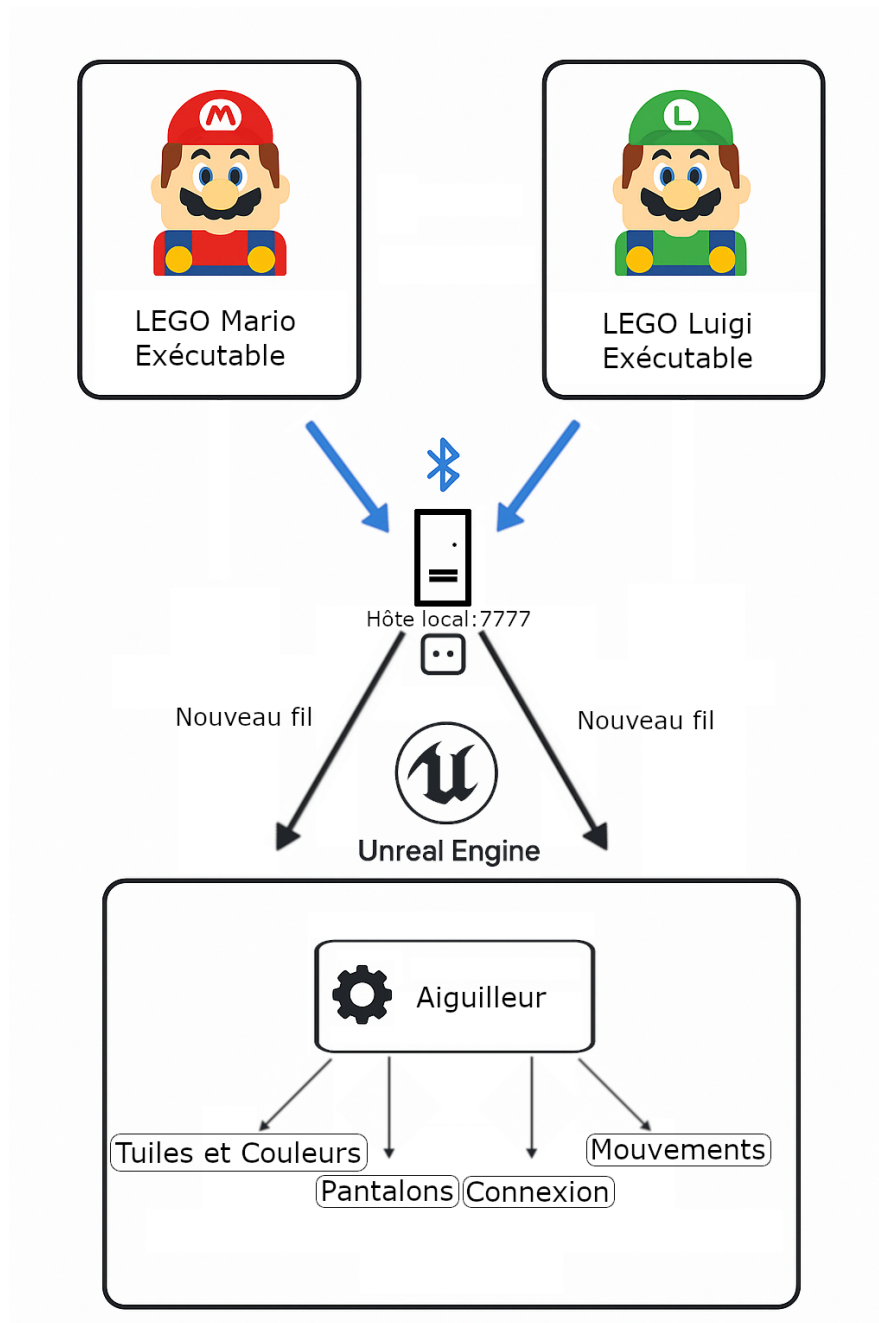
---

13. <https://github.com/Jackomatrus/pyLegoMario>

14. <https://github.com/bricklife/LEGO-Mario-Reveng>

- Transformation de ces données en objets structurés JSON, encodant des événements signifiants pour le gameplay (mouvements, détection de couleurs, détection de codes barres, etc.);
- Sérialisation et émission de ces objets via une socket TCP, ouverte localement au moment de l'exécution et connecté à Unreal Engine lors du lancement du jeu.

Dans un premier temps, une socket tcp serveur non-bloquante est initialisée et configurée pour écouter les connexions entrantes sur le port 7777, couramment utilisé dans les architectures de communication multijoueur. Lorsqu'un client tente d'établir une connexion sur ce port, le serveur accepte la requête et attribue un port de communication dédié à cette instance de connexion. Cette dernière est ensuite prise en charge par un fil indépendant, responsable de la gestion asynchrone des paquets entrants associés à ce client, sans risque de bloquer le fil principal du jeu (Figures 5.1).



**FIGURE 5.1 : Schéma des différentes couches de connection entre les LEGO et Unreal Engine**

L'identification des dispositifs connectés repose sur leur nom d'usine, typiquement « LEGO Mario » et « LEGO Luigi ». Cette identification permet d'assurer la traçabilité

et la correspondance unique entre chaque jouet et le contrôleur du jeu. L'association entre un dispositif et le contrôleur est effectuée automatiquement lors de l'établissement de la connexion, à condition que le contrôleur soit actif. Dans le cas contraire, cette procédure est différée jusqu'au démarrage d'une partie, moment où le contrôleur devient nécessairement opérationnel.

En cas de déconnexion, le dispositif LEGO envoie une requête de terminaison qui, une fois reçue par le moteur Unreal, entraîne la fermeture contrôlée de la socket correspondante ainsi que la libération du fil associé, redevenu inactif. Une interface logicielle a été développée dans Unreal Engine (Figures 5.2) pour assurer à l'utilisateur une gestion simple du processus de connexion au flux de données.

Cette architecture permet un découplage clair entre la logique d'acquisition des données capteur et la logique interne du moteur de jeu, permettant ainsi d'exploiter en temps réel les gestes effectués par l'enfant, à l'aide du jouet LEGO Mario, comme entrées directs du jeu thérapeutique, rendant chaque action physique observable et mesurable, ce qui favorise la maintenabilité, la traçabilité des événements et la synchronisation des actions. Elle assure également une gestion robuste du cycle de vie des connexions, depuis leur établissement jusqu'à leur terminaison.

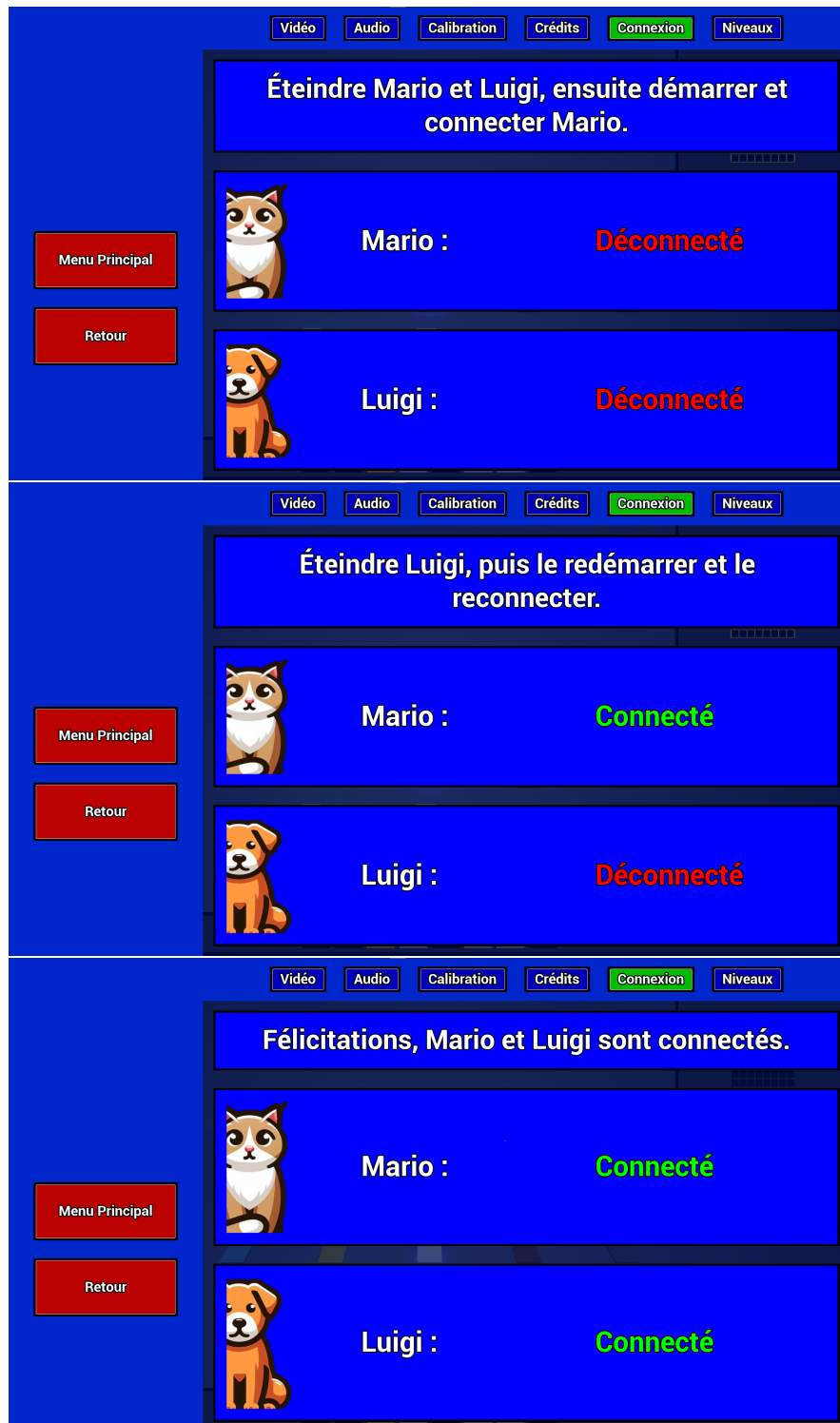


FIGURE 5.2 : Interface de connexion selon les personnages connectés

Maintenant, en réponse à la demande d'un usage unilatéral en alternance, particulièrement pertinent dans le cadre de la rééducation de type RG, le système a été étendu pour permettre la connexion simultanée de deux unités LEGO distinctes, soit LEGO Mario et LEGO Luigi. Chaque module est identifié indépendamment, et les flux de données respectifs sont acheminés vers Unreal Engine via des canaux distincts, grâce à une architecture multicoeur, assurant la gestion parallèle et fluide des deux dispositifs sans conflit d'événements.

Une fois les données des capteurs LEGO Mario et Luigi réceptionnées en temps réel dans Unreal Engine via socket, un travail d'adaptation a été entrepris pour transformer ces signaux bruts en éléments interactifs significatifs dans l'univers du jeu thérapeutique (le Tableau 5.1 présente cette transformation).

L'architecture basée sur les sockets TCP impose une attention particulière à la gestion des flux de données, puisque la réception d'un paquet peut être incomplète au moment de l'exécution d'un tick (cycle d'horloge processeur à intervalle pour synchroniser l'exécution des commandes), entraînant ainsi une corruption potentielle des données. Pour pallier ce problème, les données reçues sont d'abord stockées sous forme de bits lus, puis converties en caractères pour constituer une chaîne au format JSON. L'adoption de ce format objet permet d'identifier facilement les paquets incomplets, puisque chaque objet JSON est délimité par des accolades, tandis que les paquets complets sont agrégés dans un tableau de chaînes JSON prêt à être désérialisé. Chaque objet JSON comprend un champ ID, correspondant à l'identifiant unique du module LEGO, ainsi qu'un champ Data, contenant l'information reçue. Celle-ci est alors traitée dans l'aiguilleur pour l'envoi vers le fil du jeu au contrôleur associé à l'ID reçu (Figures 5.1).

Maintenant que l'architecture robuste des communications est fonctionnelle, il est temps d'exploiter de manière cohérente les capacités matérielles du jouet tout en développant des

interactions motivantes et potentiellement transférables à des mouvements moteurs pertinents en contexte clinique, afin de proposer un ensemble de comportements interactifs à observer, tester et discuter avec les intervenants cliniques. Ce bac à sable fonctionnel sert ainsi de support à l'évaluation des possibilités thérapeutiques, en tenant compte de la pertinence clinique, de la faisabilité motrice et du potentiel d'engagement.

**TABLEAU 5.1 : Interprétation des différentes données transitant d'un LEGO vers l'aiguilleur dans Unreal Engine**

Type d'interaction	Code reçu	Action effectuée
Inclinaison	Vecteur à 3 dimensions	Déplacement du personnage de jeu vers le vecteur directionnel reçu, impliquant une rotation interpolée au besoin
Changement de pantalons	Chaîne de caractères débutant par 0b, suivi d'un code à 6 bits	Changement de couleur du personnage
État de connexion	Chaîne de caractères : CONNECTION_COMPLETED, CONNECTION_FAILURE, CONNECTION_CLOSED	Permet la gestion de la connexion au LEGO pour commencer une partie, relancer la connexion et ou terminer celle-ci
Détection de couleur	Code hexadécimal (16 chiffres)	Coloration de plaque dans le monde virtuel
Détection de code barre	Code hexadécimal (16 chiffres)	Action spéciale comme une animation de saut

LEGO Mario est capable de détecter différentes couleurs à l'aide de son capteur optique situé sous la figurine. Ce capteur a été utilisé pour identifier huit couleurs spécifiques (Tableau 5.2), dont la reconnaissance a été associée à des modifications contextuelles dans l'environnement virtuel. Par exemple, lorsqu'un patient pose le jouet sur une surface verte, une plateforme virtuelle se voit changer de couleur en vert. Cette mécanique renforce la dimension exploratoire et sollicite à la fois la motricité fine (placement précis du LEGO) et la capacité d'association cognitive entre la couleur réelle et son effet dans le jeu. Elle permet également d'introduire des consignes thérapeutiques implicites comme « trouve et active la couleur rouge », utiles pour engager des déplacements ciblés, sans oublier le potentiel d'alternance des gestes entre

une main et l'autre. Cette section a nécessité un travail de validation supplémentaire. Sachant que la couleur standard détectée est le noir, constituant ainsi l'état de base, quand la caméra approche une nouvelle couleur, l'état va passer du noir à cette dite couleur. Cependant, lors de ce processus, il arrive que la détection initiale soit le blanc, due à la luminosité des DEL blanches sous le LEGO à partir d'une certaine distance, suivi de la couleur réelle avec une fréquence variant de quelques hertz, ce qui entraîne un effet de clignotement indésirable. Pour remédier à ce problème, une procédure de validation en deux étapes a été mise en place. Concrètement, lorsqu'un premier changement de couleur est détecté, celle-ci est mise en cache et un délai correspondant à 30 Hz empêche toute nouvelle tentative de validation, sans toutefois bloquer l'assignation de la couleur courante. Si la couleur actuellement détectée correspond à celle mise en cache 30 Hz plus tôt, l'événement est validé, et les variations erronées survenues pendant cette fenêtre temporelle sont ignorées assurant ainsi l'exactitude de l'événement.

**TABLEAU 5.2 : Tableau des couleurs reconnues et leur code hexadécimal**

<b>Code hexadécimal</b>	<b>Couleur</b>
08004501ffff1300	Blanc
08004501ffff1500	Rouge
08004501ffff1700	Bleu
08004501ffff1800	Jaune
08004501ffff1a00	Noir
08004501ffff2500	Vert
08004501ffff0c01	Mauve
08004501ffff4201	Cyan
08004501ffff6a00	Brun
08004501ffff3801	Nougat

Grâce aux accéléromètres et gyroscopes intégrés, la figurine LEGO peut détecter ses angles d'inclinaison sur les axes de tangage et de roulis. Ces données ont été traduites en

contrôles directionnels du personnage dans le monde virtuel. En inclinant LEGO Mario vers l'avant, le personnage se déplace vers l'avant dans le jeu ; en l'inclinant vers la droite ou la gauche, il pivote ou se dirige latéralement. Cette approche transforme ainsi le jouet en interface de contrôle kinesthésique, où le mouvement du poignet et de l'avant-bras de l'enfant devient directement lié à la navigation dans l'espace de jeu. Cette mécanique présente un potentiel thérapeutique important, notamment pour travailler la stabilisation, la fluidité et la coordination des mouvements distaux.

LEGO Mario peut détecter certains accessoires, notamment le changement de pantalon, via un code-barres positionné à l'intérieur des figurines LEGO (Tableau 5.3) . Cette fonction a été réutilisée pour modifier dynamiquement l'apparence ou les capacités du personnage dans le jeu. Par exemple, le pantalon feu donne un habit rouge au personnage. Au-delà de l'aspect ludique, cette mécanique offre à l'enfant un sentiment de personnalisation et d'appropriation, tout en introduisant une interaction simple, mais motivante, nécessitant une manipulation volontaire et contrôlée du jouet.

**TABLEAU 5.3 : Tableau des différents pantalons et leur code binaire**

<b>Code binaire</b>	<b>Pantalon</b>
0b11	Abeille
0b101	Luigi
0b110	Grenouille
0b1010	Tanooki
0b1100	Propeller
0b10001	Chat
0b10010	Feu
0b10100	Pingouin
0b11000	Peach
0b100001	Mario
0b100010	Constructeur
0b100011	Glace

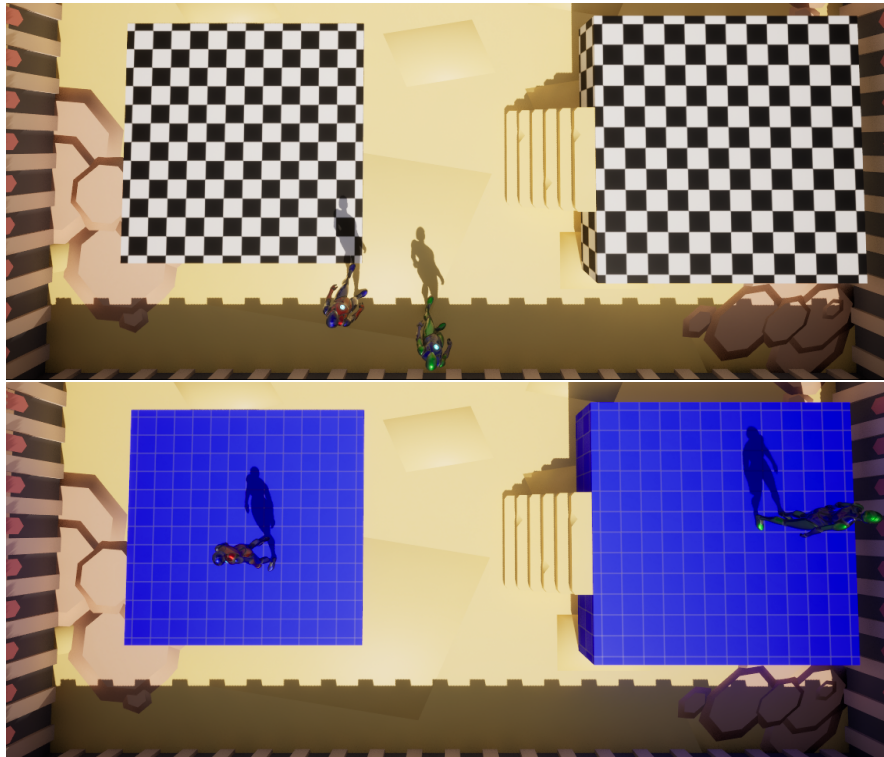
Enfin, certaines briques LEGO comportent des codes-barres uniques que la figurine est capable d'interpréter pour déclencher des animations spécifiques (Tableau 5.4). Dans le système développé, ces codes ont été associés à des actions spéciales comme un "saut spiralé", un effet d'invincibilité temporaire. Cette fonctionnalité permet d'introduire des compétences à déclenchement conditionnel, renforçant la notion de stratégie et de timing moteur. Elle peut être exploitée pour inciter l'enfant à effectuer des gestes coordonnés ou rythmés à des moments précis.

**TABEAU 5.4 : Tableau des différentes tuiles et leur code hexadécimal**

<b>Code hexadécimal</b>	<b>Tuile code barre</b>
080045011400ffff	Tuile de Rotation
08004501b800ffff	Tuile de départ
08004501b700ffff	Tuile de drapeau
080045012900ffff	Tuile de bloc
08004501ab00ffff	Tuile de balançoire

### **5.1.2 ÉLABORATION DES PROTOTYPES JOUABLES**

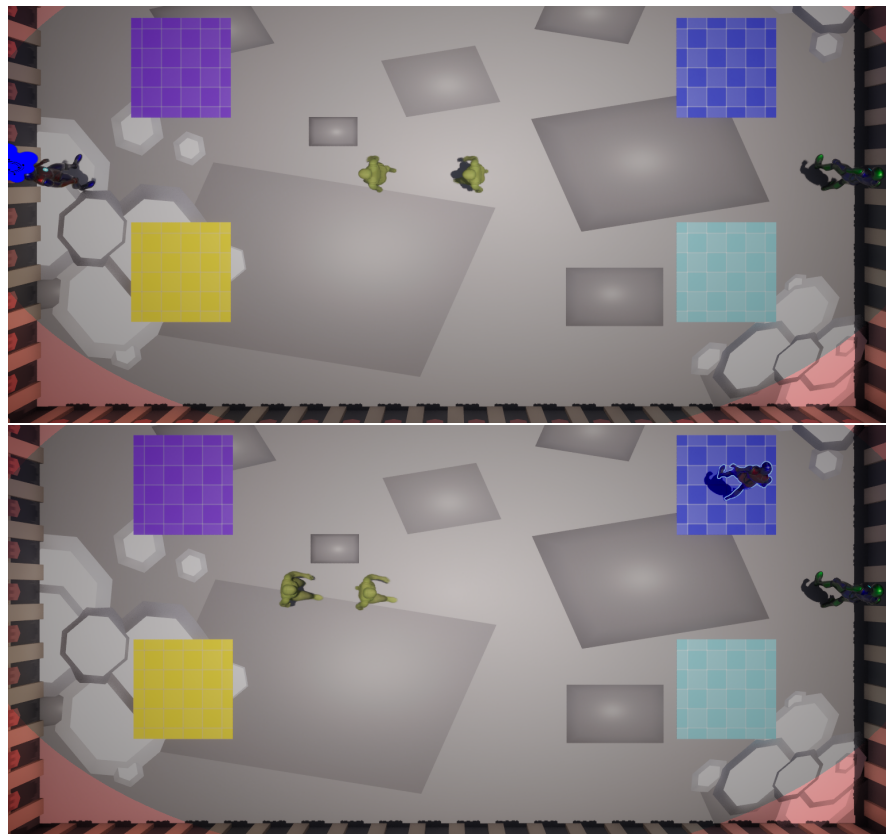
Le premier prototype (Figures 5.3) conçu à partir des mécaniques décrites proposait un scénario simple combinant contrôle directionnel par inclinaison et interaction par reconnaissance de couleur. Le joueur devait d'abord manipuler le premier personnage (contrôlé via l'inclinaison d'un des modules LEGO) pour le déplacer vers une zone cible, puis colorier une plaque au sol en fonction d'une couleur spécifiée. Une fois cette action complétée, le joueur prenait le contrôle du deuxième personnage, manipulé de manière identique à l'aide du second module LEGO, afin d'atteindre et colorier à son tour une seconde plaque, de la même couleur.



**FIGURE 5.3 : Premier prototype de jeu nécessitant la coloration de deux plaques distinctes de la même couleur**

Le deuxième prototype (Figures 5.4) développé prend la forme d'un jeu à déroulement infini, dans lequel le joueur doit survivre le plus longtemps possible à des entités hostiles contrôlées par une intelligence artificielle. L'une des mécaniques centrales repose sur la désactivation aléatoire de l'un des deux personnages contrôlés – LEGO Mario ou LEGO Luigi – rendant temporairement l'un des modules inactifs en jeu. Lorsque cette désactivation survient, le joueur doit alors déplacer le personnage hors service en l'amenant sur une brique physique correspondant à une couleur spécifique, identifiée par le capteur optique, afin de le protéger de l'attaque des intelligences artificielles. Simultanément, le contrôle est transféré au second module LEGO, qui permet de déplacer activement l'autre personnage pour échapper aux menaces jusqu'à ce que le statut des personnages s'inverse ou qu'un nouveau cycle

commence. Ce prototype vise à explorer des dynamiques de jeu basées sur la gestion de l'urgence, l'alternance de contrôle entre les deux mains, et la nécessité de réagir rapidement à des stimuli imprévus. Il offre un terrain d'expérimentation pertinent pour l'évaluation de la vitesse de réaction, de la planification motrice, et de la coordination intermanuelle dans un contexte stimulant et non répétitif.

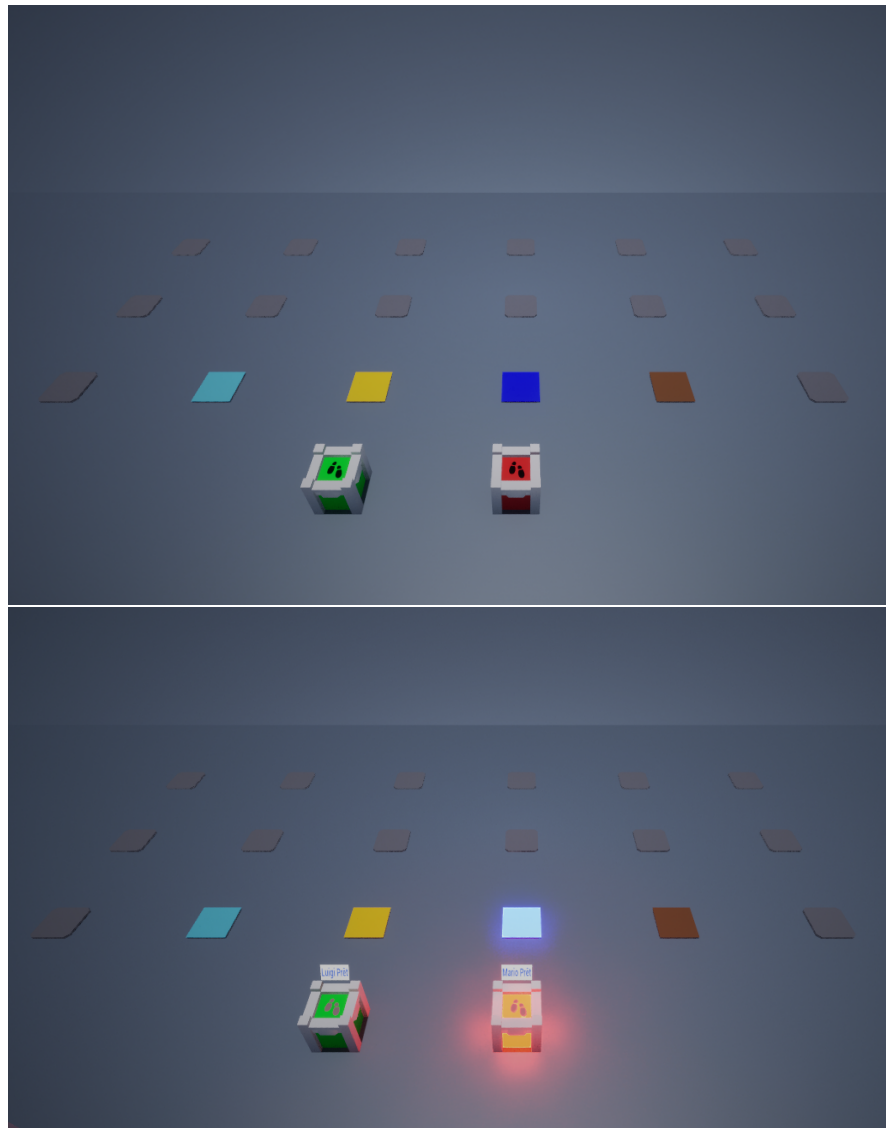


**FIGURE 5.4 : Deuxième prototype de jeu nécessitant la mise sous protection d'un personnage et la fuite de l'autre**

À la suite de l'évaluation des deux premiers prototypes par les thérapeutes impliqués dans le projet, plusieurs constats ont émergé. Si les deux expériences ont été jugées pertinentes en termes de potentiel thérapeutique, elles se sont également révélées complexes à manipuler

pour certains enfants, notamment en raison des contraintes motrices spécifiques à la population visée. Les gestes fins requis pour les contrôles par inclinaison, bien qu'intéressants sur le plan de la coordination, ont soulevé des enjeux d'accessibilité. En effet, des restrictions motrices importantes ou des compensations posturales involontaires pouvaient fausser la détection des angles ou engendrer des comportements non intentionnels à l'écran, créant de la frustration chez certains participants. Ces retours ont conduit à une réflexion sur la simplification de l'interface de contrôle, en mettant l'accent sur la réduction des risques d'erreur, l'élimination des mécaniques trop sensibles (comme le joystick basé sur l'inclinaison), et la recherche d'une relation plus directe entre l'action physique et la réponse virtuelle. De même, les codes-barres présents sur certaines briques LEGO, bien que techniquement exploitables, ont été écartés en raison de leur petite taille et du risque d'échapper le lego manipulé, peu compatibles avec une utilisation en rééducation pédiatrique visant une haute répétition.

Ces considérations ont mené au développement d'un troisième prototype (Figures 5.5), conçu comme une version simplifiée, plus robuste et plus accessible. Inspiré des classiques jeux de type "tape la taupe", ce prototype repose sur une mécanique d'exploration visuelle et de réaction rapide. Le joueur doit repérer une tour lumineuse dans l'environnement virtuel, dont la couleur clignotante indique la position où déplacer la figurine sur l'interface physique de la même couleur. Afin de choisir la bonne figurine entre LEGO Mario et LEGO Luigi, l'enfant doit aussi porter attention à laquelle des deux tours correspondantes aux figurines clignote (rouge = Mario Vert = Luigi). Seulement après avoir choisi le bon dispositif, il pourra le déplacer sur la tour repérée, afin que le capteur optique du jouet détecte celle-ci. Le jouet devra alors être replacé sur sa tour respective afin d'enclencher le minuteur qui fera clignoter une nouvelle plaque aléatoire.



**FIGURE 5.5 : Troisième prototype de jeu nécessitant de déplacer le bon lego sur la brique de couleur clignotante**

Ce prototype conserve ainsi l'un des apports les plus fiables et engageants observés dans les versions précédentes : la reconnaissance de couleurs physiques associée à une action ludique immédiate. Il permet de travailler la réactivité, l'exploration de l'espace (à travers la recherche active des surfaces colorées), et l'homothétie entre l'espace physique et l'espace

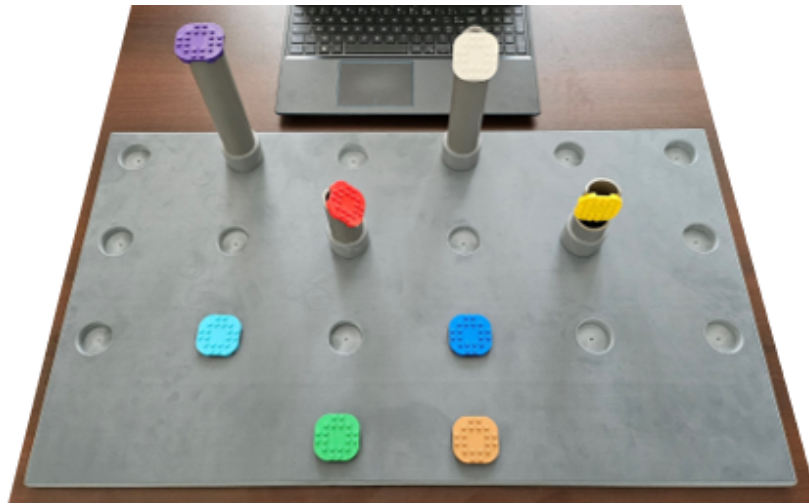
virtuel, c'est-à-dire la correspondance spatiale intuitive entre l'objet réel manipulé et sa répercussion dans le monde du jeu.

En éliminant les sources de frustration liées aux gestes complexes, ce prototype vise à stabiliser l'expérience de jeu, tout en conservant une interaction motrice significative, adaptée aux capacités variables des enfants hémiplésiques. Il constitue ainsi un socle expérimental solide pour la poursuite du développement et l'évaluation de scénarios de rééducation fondés sur la répétition, la coordination œil-main, et le succès perceptible à court terme.

### **5.1.3 DIVERSIFICATION DES NIVEAUX**

Afin de prolonger l'utilité clinique du troisième prototype et de soutenir des séances de rééducation plus longues et plus variées, un système de diversification des niveaux a été conçu. L'objectif de ce système est de maintenir l'engagement sur la durée en variant les configurations de jeu tout en permettant une adaptation fine de la difficulté, en fonction des capacités et des objectifs thérapeutiques propres à chaque enfant.

Le principe de base repose sur l'ajout de coordonnées spatiales aux tours lumineuses présentes dans le monde virtuel. Le plan de jeu est structuré en une grille de 6 colonnes par 3 lignes, offrant ainsi 18 positions distinctes (Figures 5.6) pouvant accueillir une tour. En raison de la limitation actuelle à huit couleurs distinctement reconnues par la caméra de LEGO Mario, chaque niveau peut comporter jusqu'à six tours actives simultanément, sans oublier que le rouge est propre à Mario et le vert à Luigi, tout en assurant que chaque tour a une couleur unique.



**FIGURE 5.6 : Représentation d'un exemple de disposition physique comprenant différents types de mouvements dans différents angles et hauteurs**

Dans le cadre du développement, un ensemble de 62 niveaux distincts a été conçu en collaboration avec les chercheurs du projet. Ces niveaux sont organisés selon huit variantes posturales, correspondant à différents objectifs de sollicitation motrice :

- Position au sol (à plat) ;
- Hauteur variable (10 cm ou 20 cm) ;
- Mouvements de supination (à 45° ou 90°) ;
- Mouvements d'extension (à 45° ou 90°) ;
- Combinaisons de supination et d'extension (à 45° ou 90°).

Un soin particulier a été apporté à l'agencement des tours afin d'éviter les problèmes d'occlusion visuelle (une tour haute ne masque jamais une tour plus basse), garantissant une lisibilité optimale du tableau de jeu. Chaque disposition physique est représentée sous forme d'une graine (« *seed* ») codée en cinq chiffres pour l'environnement virtuel, chacun correspondant à un paramètre :

- Les deux premiers chiffres : position sur la grille (00 à 17);
- Le troisième chiffre : angle d'inclinaison (0 = à plat, 1 = 45°, 2 = 90°);
- Le quatrième chiffre : hauteur physique de la tour (0 = sol, 1 = 10 cm, 2 = 20 cm);
- Le cinquième chiffre : type de mouvement ciblé (0 = neutre, 1 = extension, 2 = supination).

À partir de ces graines, l'ensemble des niveaux est importé dans une table de données structurées dans Unreal Engine. Le chargement est entièrement dynamique, ce qui permet une grande flexibilité de déploiement à la volée si de nouvelles couleurs ou configurations deviennent disponibles dans le futur. Le système est conçu de manière à permettre l'extension facile du catalogue de niveaux (par exemple, avec plus de six tours si la reconnaissance de couleurs est étendue).

Ce système modulaire permet également une granularité précise de la difficulté. Les niveaux peuvent être sélectionnés selon leur densité spatiale. Une disposition resserrée des tours étant plus facile, une répartition plus large augmentant la difficulté. De plus, les thérapeutes ont la possibilité de choisir la latéralité dominante du niveau, en fonction du membre le plus atteint, afin de soit réduire les déplacements difficiles, soit au contraire cibler un travail moteur plus intensif dans une zone spécifique de l'espace. Une interface utilisateur simple et facile à prendre en main a été créée afin de simplifier la sélection du niveau et expose les différents paramètres que le thérapeute peut choisir manuellement (Les Figures 5.7 présentent des captures d'écran). Au total, 496 dispositions différentes sont disponibles au travers des 62 niveaux créés.

L'ensemble de cette infrastructure ouvre la voie à une rejouabilité étendue, essentielle à la mise en place de séances répétées sans perte d'intérêt, tout en donnant aux professionnels un



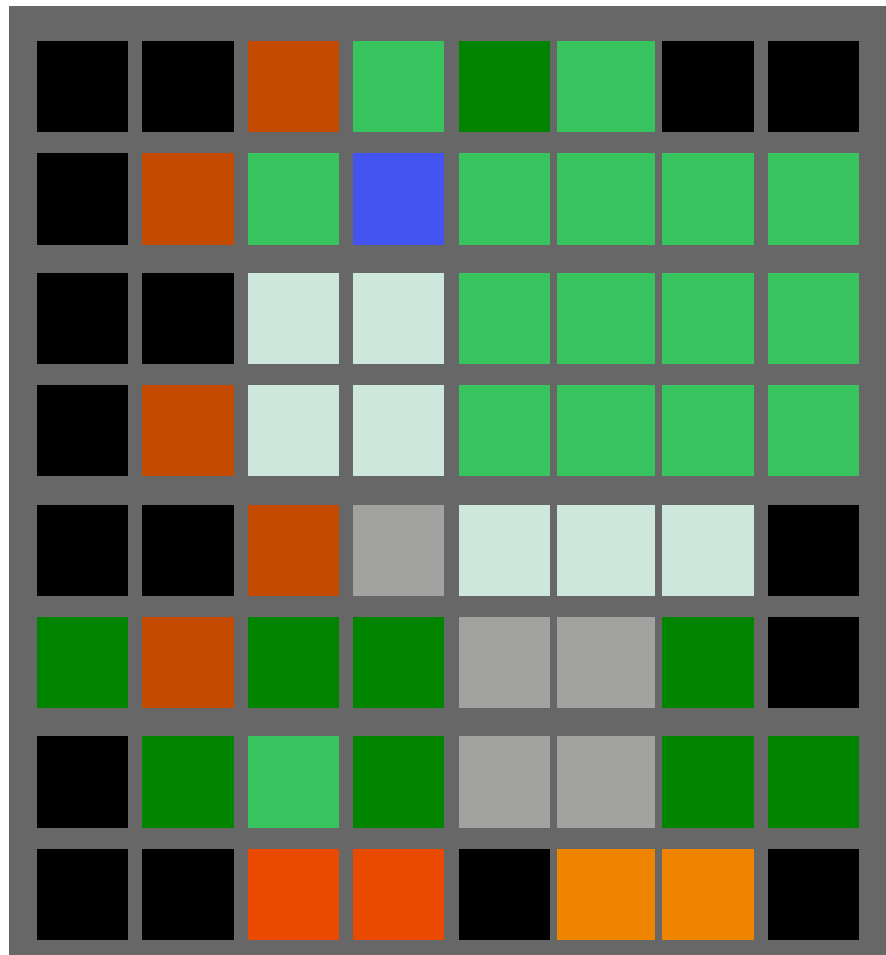
**FIGURE 5.7 : Représentation de l’interface développée pour la sélection de niveaux**

outil précis de calibration de la tâche thérapeutique. Ce niveau de personnalisation soutient une approche centrée sur l’enfant, où les paramètres moteurs, cognitifs et motivationnels peuvent être pris en compte de manière conjointe.

#### **5.1.4 RENFORCEMENT DE LA MOTIVATION**

Dans un contexte de rééducation pédiatrique, le maintien de la motivation au fil du temps constitue un enjeu central, particulièrement lorsque les séances s’inscrivent dans une logique de répétition. Bien que le système de niveaux offre déjà une diversité appréciable grâce à ses 62 configurations combinatoires, il était nécessaire de stimuler l’envie de rejouer, de valider sa progression, et de donner un sens immédiat aux efforts fournis par l’enfant. C’est dans cette optique qu’a été conçu un système de récompenses visuelles fondé sur des oeuvres en pixel

art (Figures 5.13), conçu pour renforcer l'engagement émotionnel tout en offrant une trace tangible de l'avancement.



**FIGURE 5.8 : Représentation d'un pixel art**

Ce système repose sur une structure en étapes successives. Chaque ligne d'un dessin en pixel art correspond à une manche du niveau (les Figures 5.9 présentent des captures d'écran lorsqu'une ligne est réussie et que le sous-niveau suivant est lancé, ainsi que l'interface de sélection d'un sous niveau lorsque l'on voudrait compléter un pixel art en entier). Par exemple, si la première ligne contient trois pixels, l'enfant devra activer trois plaques colorées dans le

monde du jeu pour compléter cette ligne et débloquer la suivante. Le processus se poursuit sans interruption de chargement, à l'intérieur d'un seul et même niveau, jusqu'à ce que l'ensemble des lignes du pixel art soit révélé, marquant la réussite complète du niveau.

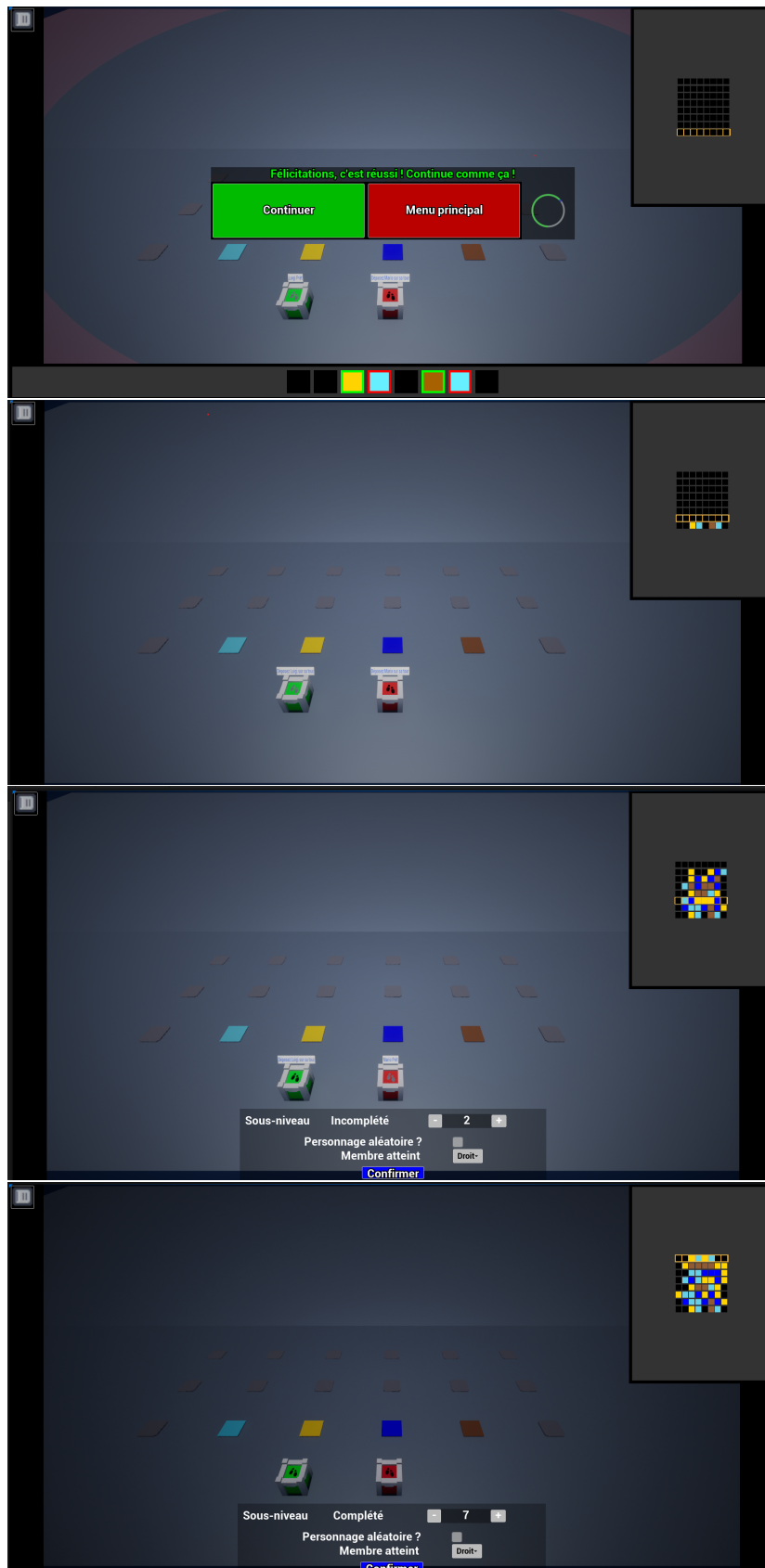
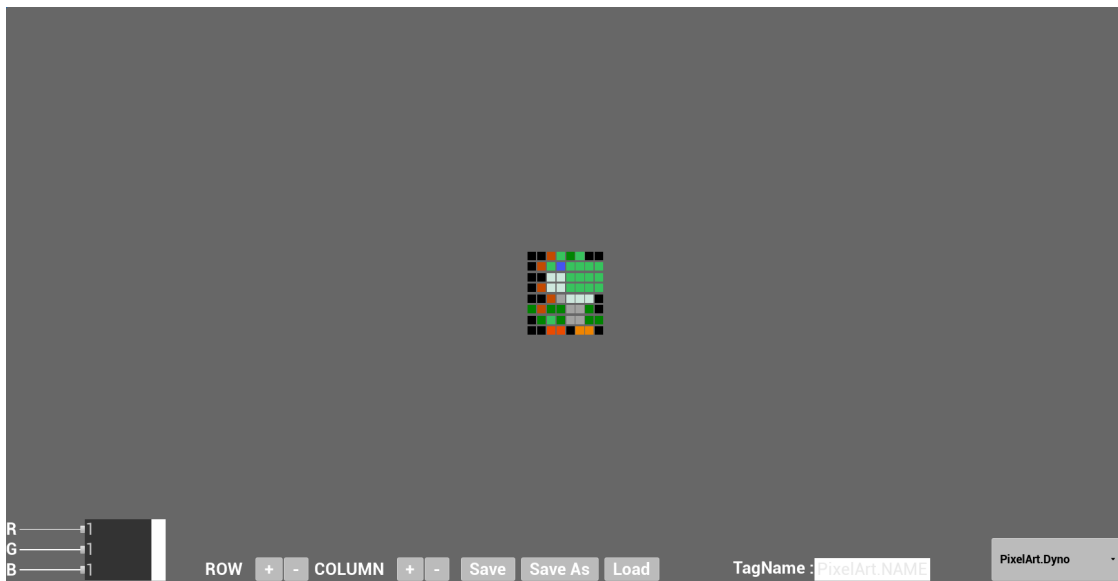


FIGURE 5.9 : Représentation en jeu de différentes étapes de progression du pixel art

Chaque pixel coloré correspond directement à une plaque activée. Sa teinte dépend de la couleur réelle de la plaque touchée, générant ainsi un effet de mosaïque dynamique. Cette correspondance donne un rôle concret à chaque action de l'enfant, en l'intégrant dans une représentation graphique évolutive. L'enfant voit ainsi le dessin se construire au fil des réussites, ce qui crée un effet de curiosité et d'anticipation. Deviner l'image finale devient une source de motivation intrinsèque. Cette mécanique s'appuie sur des principes de renforcement positif visuel, tout en évitant une surcharge cognitive ou des mécaniques de gamification excessives.

Techniquement, chaque œuvre en pixel art est entreposée sous forme de tableau de valeurs, permettant une gestion dynamique, un affichage fluide et une grande extensibilité. Les images sont initialement générées par un processus d'analyse et de réduction de résolution à partir d'images classiques, converties automatiquement en tableaux de pixels. Un outil de correction manuelle a été développé (Figures 5.10) pour ajuster les artefacts ou imperfections résultant de la compression, garantissant une lisibilité cohérente à l'écran.



**FIGURE 5.10 : Représentation de l’outil permettant de corriger les artéfacts et créer des pixels arts**

Enfin, la conception respecte une limite maximale de 26 lignes par 16 colonnes, assurant que l’ensemble du dessin demeure visible sur l’interface utilisateur sans nuire à la lisibilité du jeu. La structure modulaire du système permet également, dans le futur, d’importer de nouveaux dessins personnalisés ou de permettre aux thérapeutes de concevoir leurs propres pixels arts adaptés à chaque enfant, renforçant encore l’appropriation de l’outil. En somme, ce système de récompenses visuelles contribue à l’ancrage motivationnel du gameplay, en articulant de manière lisible et gratifiante la progression motrice et la reconnaissance de l’effort, tout en stimulant la rejouabilité par la curiosité visuelle.

### **5.1.5 MISE EN PLACE D’UN AJUSTEMENT DYNAMIQUE DE LA DIFFICULTÉ**

Si le système de progression par pixel art a été pensé pour maintenir l’intérêt de l’enfant tout au long de la séance, il est vite apparu qu’une absence de défi réel risquait de banaliser la tâche et d’affaiblir le sentiment de réussite. Il était donc nécessaire d’introduire un mécanisme

d'échec partiel, à la fois tolérant et motivant. Sur cette base, un seuil de réussite a été défini. Un niveau est considéré comme complété à partir de 80% de réussite, avec une tolérance de 20% d'erreur, arrondie à l'entier supérieur (avec un minimum d'une erreur acceptée). Par exemple, pour une ligne de sept pixels, l'enfant peut manquer jusqu'à deux plaques sans compromettre sa progression. Cette marge d'erreur contrôlée vise à créer une tension constructive, en valorisant l'effort sans punir sévèrement l'imprécision, et laisse également à l'enfant la liberté de revenir rejouer un niveau pour le compléter à 100% s'il le souhaite.

Initialement, un ajustement manuel des paramètres de difficulté par le thérapeute avait été envisagé, mais cette approche s'est révélée insuffisante. Il était difficile de maintenir un niveau de défi optimal entre chaque ligne sans risquer de rendre le jeu trop difficile, ou au contraire trop simple. Une logique dynamique et personnalisée s'est donc imposée comme une solution plus robuste et plus efficace.

Un système de profil utilisateur a été mis en place (Figures 5.11) afin de centraliser les données de performance et d'assurer une continuité dans l'ajustement de la difficulté. Chaque profil enregistre les temps d'exposition des plaques (le temps pendant lequel une tour clignote) et les temps d'enclenchement (le moment où la plaque est activée par la figurine), ainsi que l'historique de réussite ou d'échec. Ces données sont liées de manière explicite au système de graine qui encode la configuration complète du niveau (position de la plaque, type de mouvement sollicité, hauteur, inclinaison, etc.). Cette structuration garantit que les performances enregistrées sont contextualisées avec précision, évitant par exemple que le temps moyen d'activation d'une plaque à plat soit indûment comparé à celui d'une plaque en supination à 45°, située pourtant au même emplacement dans l'espace de jeu. De plus, afin de tenir compte des différences de maniabilité liées au côté atteint par l'enfant, les données de performance sont également différenciées selon la figurine utilisée (LEGO Mario ou Luigi). Cette précaution permet d'éviter de biaiser les calculs de difficulté dans le cas où une des

deux mains présenterait une limitation plus marquée, rendant un mouvement asymétrique plus complexe selon la main sollicitée. Cette segmentation des données, à la fois spatiale, posturale et latérale, constitue un fondement essentiel pour la personnalisation fine du défi moteur proposé à chaque joueur. Le système permet aussi de gérer plusieurs enfants sur un même poste, en simplifiant la sélection de leur profil au début de la session.



**FIGURE 5.11 : Représentation de l'interface de sélection des différents profils**

Une analyse des paramètres ajustables a révélé que le temps d'exposition de la plaque lumineuse constituait la variable clé à moduler dynamiquement. Bien qu'un second paramètre, le temps de repos entre les activations, a été identifié, celui-ci a été volontairement exclu du système automatique. Son ajustement est laissé aux thérapeutes, car il est plus sensible aux facteurs externes (fatigue, état émotionnel, compensation motrice, confusion), et une mauvaise configuration peut entraîner une succession d'échecs frustrants, notamment si l'enfant n'a pas

le temps de reposer la figurine entre deux tours. Il semblait donc essentiel de déclencher le temps de la prochaine plaque uniquement lorsque la figurine en cours est replacée sur sa tour.

Afin de prévenir une série d'échecs, une logique de temporisation compensatoire a été intégrée. Lorsqu'une ligne est manquée, un temps additionnel temporaire est appliqué aux premières plaques de la ligne suivante, permettant à l'enfant de retrouver un rythme moteur plus calme et éviter l'escalade d'échecs. Ce temps est réparti selon un schéma dégressif sur 40% des premières plaques, par exemple, sur une ligne de 8 plaques :

- t1 reçoit +40% du temps calculé
- t2 reçoit +26,66%
- t3 reçoit +13,33%
- t4 à t8 ne sont pas ajustées

Le cœur de l'ajustement dynamique repose sur une logique de classification des performances selon une règle composite, qui d'une part va permettre de trier un jeu de donnée selon le taux de complétion de niveaux, le taux de cible atteinte, ainsi que l'état de la série de victoire ou de défaite (Figures 5.12). Les différentes classifications peuvent être définies de la sorte :

- EDP\_xBest : Ce modèle est activé lorsque l'enfant démontre une performance stable et supérieure, suggérant qu'il se trouve dans un état de flow avancé. Le niveau de difficulté est alors maintenu à son seuil maximal afin d'éviter l'ennui et de continuer à stimuler activement l'engagement moteur.
- EDP\_Average : Ce profil correspond à une phase de performance équilibrée, typique d'un flow modéré. Le niveau de difficulté est stabilisé, évitant à la fois les échecs répétés et la lassitude, pour soutenir un rythme d'apprentissage durable.

- EDP\_xWorst : Ce modèle est utilisé en phase de transition descendante, lorsqu'un désengagement ou une série d'échecs commence à se manifester. Le système devient alors plus permissif, en réduisant temporairement la difficulté afin de prévenir un décrochage motivationnel.
- EDP\_Worst : Ce dernier modèle est réservé aux situations de récupération post-échec consécutif, où la priorité est de restaurer la confiance de l'enfant. La difficulté est significativement réduite pour offrir une série de réussites accessibles, servant de relance positive du processus d'engagement.

```

if (WinRate > .85f && HitRate >= .9f && bIsWinStreak && Streak >= 2)return EDifficultyPattern::EDP_XBest;
if (WinRate > .75f && HitRate >= .8f)
{
    if (!bIsWinStreak)
    {
        if (Streak == 2)return EDifficultyPattern::EDP_XWorst;
        if (Streak >= 3)return EDifficultyPattern::EDP_Worst;
    }
    return EDifficultyPattern::EDP_Average;
}
if (!bIsWinStreak)return EDifficultyPattern::EDP_Worst;

```

**FIGURE 5.12 : Représentation de l'algorithme de classification des performances**

Par la suite, la deuxième règle vient jouer le rôle d'attribuer le pourcentage de donnée qui sera utilisé pour générer le temps effectif de chaque tour individuellement parmi le jeu de données initial. Ainsi si en général, les données montrent un très haut taux de réussite, mais que certaines tours n'ont pas été bien réussies, cette deuxième règle permettra d'être plus permissif sur celles-ci comparativement à une autre tour qui aurait bien été réussie. C'est d'ailleurs cette deuxième règle qui sera appelée ou pas dans le cas où trois données n'auraient pas encore été obtenues afin d'avoir un temps infini jusqu'à leur obtention. Encore dans une optique de ne pas provoquer d'échec incontrôlé, au minimum 10% des valeurs totales seront

utilisées pour générer la difficulté dans le cas où le profil de classification nécessiterait un pourcentage des valeurs. Ainsi si par un coup de chance l'enfant aurait obtenu un temps très court, il verrait tout de même un certain ajustement avec les autres données, ainsi réduisant le risque d'exiger un temps qui ne pourrait pas être dépassé du fait de la nature chanceuse qu'il a déjà le précédent. La formule pour établir ce pourcentage repose sur l'équation (5.1), définie par les variables suivantes :

- W = Total de victoires
- G = Total de parties jouées
- E = Total de temps d'exposition
- S = Série de victoires ou d'échecs
- b = indicateur de série (1=victoire, 0=échec)

$$X = 0.5E \left( 1 - \left( \frac{2W}{G} - 1 \right)^2 \right) \quad \text{où } X \geq 0.1E \quad (5.1)$$

Enfin, une équation de pondération logarithme (5.2a) a été mise en place pour ajuster l'influence du temps d'exposition généré par la règle composite ci-dessus et du temps touché généré encore une fois avec la règle composite, sur le temps calculé pour la nouvelle ligne. Cela permet, de pair avec l'équation (5.2b), de converger progressivement vers un temps de défi optimal, sans jamais l'atteindre brutalement, comme on peut le voir dans (Figures 5.13). Voici les différentes variables et leur définition :

- Te = Temps d'exposition
- Tt = Temps touché
- D = |Te-Tt| différence absolue
- W = Poids

—  $T_c$  = Temps calculé

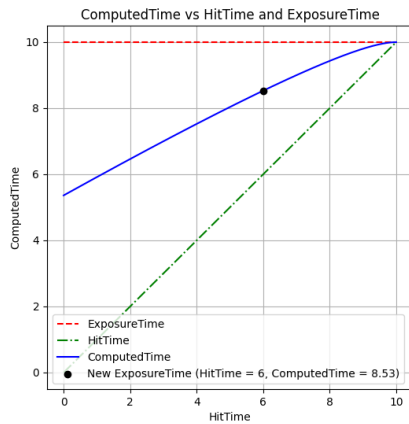
$$W = \frac{1}{0.25 \ln(D + 1) + 1} \quad (5.2a)$$

$$T_c = T_e \cdot W + T_t \cdot (1 - W) \quad (5.2b)$$

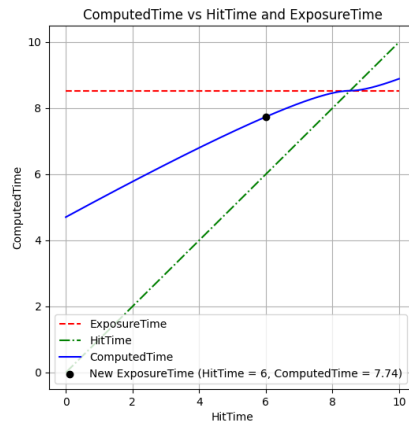
## 5.2 ÉVALUATION DU PROTOTYPE DE JEU

L'évaluation du prototype s'est appuyée sur une série de douze séances encadrées exclusivement par les 5 thérapeutes partenaires du projet, conformément aux contraintes éthiques et institutionnelles entourant la participation d'enfants à des activités expérimentales. Les objectifs de ces séances étaient centrés sur l'observation des aspects fonctionnels du système dans un contexte de rééducation motrice, ainsi que sur la réception comportementale et motivationnelle des enfants face à l'outil.

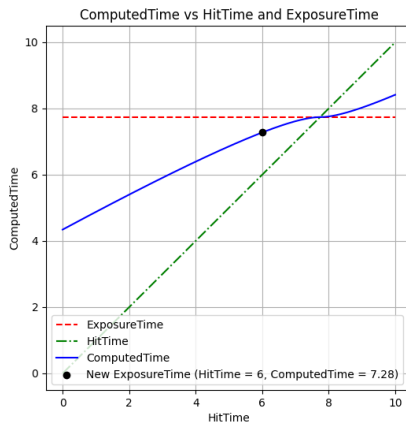
Les thérapeutes ont activement participé au processus de développement en amont, dans une logique de co-conception. Cette implication a facilité l'émergence d'un prototype dont les composantes (mécaniques de jeu, configuration matérielle, interface utilisateur) étaient alignées sur leurs attentes cliniques. Bien que les évaluations techniques n'aient pas fait l'objet d'une analyse approfondie lors des séances, les thérapeutes ont unanimement reconnu la pertinence thérapeutique du prototype, estimant que les interactions proposées favorisaient la mobilisation motrice recherchée dans les objectifs de réadaptation de type RG à haut niveau de répétition.



(a) Représentation graphique de la fonction de pondération logarithme lors d'une première partie avec un temps touché de 6 secondes résultant à un temps calculé de 8.53 pour le temps d'exposition lors de la prochaine partie



(b) Représentation graphique de la fonction de pondération logarithme avec les résultats de la première partie avec un temps touché de 6 secondes résultant à un temps calculé de 7.74 pour le temps d'exposition lors de la prochaine partie



(c) Représentation graphique de la fonction de pondération logarithme avec les résultats de la deuxième partie avec un temps touché de 6 secondes résultant à un temps calculé de 7.28 pour le temps d'exposition lors de la prochaine partie

**FIGURE 5.13 : Représentation graphique sur trois parties consécutives où les valeurs de temps calculé représentent le temps d'exposition de la prochaine partie selon le temps touché**

Une attention particulière a été portée à l'ajustement dynamique de la difficulté, initialement perçue avec prudence. Certains thérapeutes craignaient que l'automatisation de la difficulté ne perturbe l'évaluation clinique en introduisant des écarts d'intensité difficiles à interpréter. Ces réticences se sont toutefois estompées au fil des sessions. Le système s'est montré suffisamment souple pour ajuster la difficulté de manière graduelle, sans provoquer d'instabilité dans la progression du jeu ou de rejet de la part des enfants. Des épisodes de frustration ponctuelle ont été observés chez certains enfants lors d'échecs répétés, mais ces situations ont souvent été suivies d'un engagement accru visant à terminer le pixel art affiché à l'écran. Ce comportement a été interprété par les thérapeutes comme un signe de persévérance et d'autorégulation, deux qualités recherchées dans les démarches de rééducation.

Dans plusieurs cas, les enfants ont exprimé leur propre objectif de séance, consistant par exemple à compléter un pixel art complet dans une durée de 20 minutes. Pour atteindre cet objectif, ils exécutaient plusieurs centaines de mouvements au cours de la session, sans relâchement manifeste. Cette capacité à maintenir l'effort et l'attention dans la durée a été relevée comme un indice fort de motivation intrinsèque, soutenue par la structure ludique du jeu et son système de récompenses progressives.

Au-delà des observations en séance, des retours indirects ont également été recueillis via les thérapeutes, qui ont rapporté des réactions positives de la part des parents. Certains enfants discutaient spontanément des séances à la maison, et manifestaient de l'enthousiasme à l'idée de retrouver le jeu. Ces éléments suggèrent que l'expérience était perçue positivement par les enfants, et qu'elle générait un attachement au dispositif, renforcé par la symbolique familière des figurines LEGO. Ce phénomène a notamment été illustré par le surnom donné à l'un des thérapeutes, affectueusement appelé Monsieur LEGO par les enfants.

## DISCUSSION

Le développement du prototype présenté dans ce mémoire s'inscrit à la croisée de plusieurs domaines : la rééducation motrice pédiatrique, le jeu sérieux, et l'exploitation de dispositifs embarqués ludiques comme support thérapeutique. L'intégration des figurines LEGO Mario et Luigi dans une interface de jeu développée sous Unreal Engine 5 a permis de mettre en place un système interactif original, combinant interaction tangible, diversité motrice et structuration motivationnelle par la récompense visuelle.

La co-conception avec les thérapeutes a constitué une force majeure du projet. Elle a permis d'orienter dès le départ les choix techniques et ergonomiques vers des objectifs cliniques concrets grâce à plusieurs suivis allant d'une à plusieurs fois semaines, assurant ainsi une adéquation forte entre les mécaniques de jeu et les capacités fonctionnelles des enfants ciblés. Le prototype final a été perçu par les professionnels comme une solution prometteuse, capable de répondre aux attentes cliniques en matière d'amplitude et de répétition des mouvements, tout en suscitant un haut niveau d'engagement chez les enfants.

Parmi les apports notables, le système de progression par pixel art a joué un rôle central dans la structuration de la motivation des joueurs. En introduisant une récompense progressive, lisible et personnalisée, il a renforcé l'adhésion au jeu tout en soutenant la répétition de gestes moteurs. La granularité du défi, couplée à la capacité de choix thérapeutique des niveaux, a également permis une adaptation fine des séances aux profils individuels.

La mise en œuvre d'un ajustement dynamique de la difficulté constitue un second apport clé. Initialement redoutée par les thérapeutes en raison de son caractère automatisé et potentiellement opaque, elle s'est révélée efficace pour maintenir un niveau de défi optimal, même chez des enfants présentant des limitations importantes. L'introduction d'un système

de profils utilisateurs et d'une pondération exponentielle basée sur les temps d'exposition et d'enclenchement a permis d'offrir une expérience de jeu progressive, stimulante et non punitive, tout en laissant aux professionnels la liberté de moduler certains paramètres sensibles.

Par ailleurs, bien que le système d'ajustement dynamique de la difficulté ait démontré une application convaincante sur le terrain, notamment en soutenant la motivation et l'implication des enfants, aucune comparaison directe n'a été menée avec un modèle d'ajustement linéaire ou fixe. Cette absence de comparaison ne résulte pas d'un oubli méthodologique, mais d'un choix assumé de développement participatif, dans lequel le prototype a évolué en fonction des retours continus des cliniciens. Cette démarche itérative, bien que très bénéfique pour l'adéquation fonctionnelle du système, a rendu impossible la création simultanée de deux versions finalisées à tester en parallèle, limitant ainsi les possibilités d'analyse comparative contrôlée sur l'efficacité respective des différents modèles d'adaptation.

Enfin, la structure modulaire du système, sa gestion automatisée des profils, et son interfaçage générique permettent d'envisager de nombreuses perspectives d'évolution. De nouvelles configurations de jeu, de nouvelles rétroactions sensorielles, ou encore l'intégration d'autres capteurs pourraient être facilement implémentées dans une optique de personnalisation accrue. Le système, déjà fonctionnel en contexte supervisé, pourrait également être adapté à des environnements semi-autonomes (domicile ou école), ouvrant la voie à des prolongements cliniques à plus grande échelle.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce mémoire avait pour objectif d'explorer comment un dispositif ludique issu du commerce, tel que le LEGO Mario, pouvait être mobilisé dans un cadre thérapeutique structuré pour soutenir la rééducation motrice d'enfants atteints d'hémiplégie. En s'appuyant sur une démarche de développement participatif et itératif, impliquant des thérapeutes spécialisés et des chercheurs issus de plusieurs disciplines, un prototype de jeu sérieux a été conçu, implémenté, expérimenté et évalué dans des contextes cliniques réels.

Ce travail a permis de démontrer la faisabilité technique d'une intégration complète des données capteur du LEGO Mario et Luigi dans un environnement Unreal Engine, de proposer des mécaniques de jeu cliniquement pertinentes, et de développer une interface suffisamment souple pour s'adapter aux besoins thérapeutiques spécifiques d'une population pédiatrique. L'originalité du système repose notamment sur son modèle dynamique de difficulté, sur un système de récompense visuelle progressif par pixel art, et sur une structure modulaire permettant une grande diversité d'interactions et de scénarios.

Les retours des thérapeutes, observateurs principaux des séances, ont mis en évidence un fort potentiel motivationnel, une capacité d'adaptation aux profils moteurs individuels, et une réception très positive de la part des enfants. Le système a su conjuguer des objectifs de rééducation à une expérience de jeu engageante, concrète, et valorisante pour les jeunes participants.

Certaines limites doivent néanmoins être reconnues. Les résultats cliniques détaillés, bien qu'existants, n'ont pas été directement accessibles pour ce mémoire à cause de l'accord éthique engageant des données de santé auxquelles seuls les thérapeutes avaient accès sans pouvoir les partager. Par ailleurs, bien que l'ajustement dynamique de la difficulté ait montré

des résultats encourageants, aucune comparaison formelle avec un modèle linéaire n'a pu être menée, en raison du choix méthodologique de codéveloppement en temps réel. Cela n'enlève rien à la pertinence du modèle mis en œuvre, mais ouvre la voie à des validations expérimentales plus rigoureuses dans de futurs travaux.

Par ailleurs, bien que le dispositif ait été conçu pour permettre la connexion simultanée de deux jouets LEGO (Mario et Luigi), ceux-ci ont été utilisés en alternance par le membre atteint, dans le but de renforcer les mouvements de type RG et de relâchement. Cette approche visait à cibler spécifiquement les fonctions motrices du côté hémiplégique. Une piste intéressante à explorer dans de futurs travaux serait l'élaboration d'exercices bimanuels, mobilisant simultanément les deux jouets pour engager les deux membres supérieurs. Une telle orientation permettrait de concevoir des scénarios favorisant la coordination bilatérale, la symétrie gestuelle et l'engagement moteur global, éléments particulièrement pertinents dans la rééducation de certaines formes d'atteintes neurologiques pédiatriques. Cette perspective pourrait enrichir les capacités du système à soutenir des objectifs thérapeutiques plus larges, dans des protocoles supervisés ou autonomes.

À l'issue de ce projet, le prototype développé constitue une preuve de concept fonctionnelle pour une nouvelle approche de la rééducation motrice pédiatrique, fondée sur la ludification, l'accessibilité technologique et l'adaptabilité thérapeutique. Il ouvre la voie à plusieurs perspectives concrètes, telles que l'extension du système à d'autres contextes (domicile, école), l'élargissement des modalités d'interaction (rétroaction haptique, commandes vocales, multijoueur), ou encore la mise en place d'études longitudinales comparatives, intégrant à la fois des mesures objectives de progression et des analyses d'expérience utilisateur.

Ce mémoire aura ainsi permis de poser les bases d'un outil à la fois innovant, adapté et cliniquement prometteur, tout en contribuant à une meilleure compréhension des enjeux liés à

la conception de jeux thérapeutiques intégrant des objets connectés dans le champ de la santé. Le travail présenté dans ce mémoire a fait l'objet d'une publication à « *Games and Learning Alliance Conference 2025* »<sup>15</sup> [31].

---

15. <https://conf.seriousgamessociety.org/>

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] “IoT connections worldwide 2034.” [En ligne]. Repéré à : <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/>
  
- [2] R. Lohiya et A. Thakkar, “Application Domains, Evaluation Data Sets, and Research Challenges of IoT : A Systematic Review,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, n° 11, pp. 8774–8798, juin 2021. [En ligne]. Repéré à : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9311636>
  
- [3] Y. Zhao, L. Wang, Z. Liu, Y. Xu, F. Dang, X. Wang, H. Zhao, et X. Miao, “A Comprehensive Evaluation of Bluetooth Low Energy Mesh,” dans *2024 IEEE 30th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)*, octobre 2024, pp. 544–551, iSSN : 2690-5965. [En ligne]. Repéré à : <https://ieeexplore.ieee.org/document/10763675>
  
- [4] S. Chabrier, A. Roubertie, D. Allard, C. Bonhomme, et V. Gautheron, “[New developments in spastic unilateral cerebral palsy],” *Revue Neurologique*, vol. 166, n° 6-7, pp. 565–573, 2010.
  
- [5] A.-C. Eliasson et A. M. Gordon, “Impaired force coordination during object release in children with hemiplegic cerebral palsy,” *Developmental Medicine & Child Neurology*, vol. 42, n° 4, pp. 228–234, 2000, \_eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1469-8749.2000.tb00077.x>. [En ligne]. Repéré à : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1469-8749.2000.tb00077.x>
  
- [6] S. N. Kukke, L. A. Curatalo, A. C. de Campos, M. Hallett, K. E. Alter, et D. L. Damiano, “Coordination of Reach-to-Grasp Kinematics in Individuals With Childhood-Onset Dystonia Due to Hemiplegic Cerebral Palsy,” *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 24, n° 5, pp. 582–590, mai 2016. [En ligne]. Repéré à : <https://ieeexplore.ieee.org/document/7163352>
  
- [7] “Box and Block Test (BBT) – Strokengine.” [En ligne]. Repéré à : <https://strokengine.ca/fr/assessments/box-and-block-test-bbt/>
  
- [8] W. Li, G. Zhu, Y. Lu, J. Wu, Z. Fu, J. Tang, G. Zhang, et D. Xu, “The relationship between rehabilitation motivation and upper limb motor function in stroke patients,”

*Frontiers in Neurology*, vol. 15, mai 2024, publisher : Frontiers. [En ligne]. Repéré à : <https://www.frontiersin.org/journals/neurology/articles/10.3389/fneur.2024.1390811/full>

- [9] M. Csikszentmihalyi, *Flow : The Psychology of Optimal Experience*. New York : Harper & Row, 1990.
- [10] K. C. Collins, N. C. Kennedy, A. Clark, et V. M. Pomeroy, “Getting a kinematic handle on reach-to-grasp : a meta-analysis,” *Physiotherapy*, vol. 104, n° 2, pp. 153–166, 2018.
- [11] V. Mathiowetz, S. Federman, et D. Wiemer, “Box and block test of manual dexterity : norms for 6–19 year olds,” *Canadian Journal of Occupational Therapy*, vol. 52, n° 5, pp. 241–245, 1985.
- [12] H. Bhatia, S. N. Panda, et D. Nagpal, “Internet of Things and its Applications in Healthcare-A Survey,” dans *2020 8th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO)*, juin 2020, pp. 305–310. [En ligne]. Repéré à : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9197816>
- [13] “Nombre d’objets connectés par secteur dans le monde.” [En ligne]. Repéré à : <https://fr.statista.com/statistiques/1416720/nombre-objets-connectes-par-secteur/>
- [14] “Accéléromètre,” février 2025, page Version ID : 223448063. [En ligne]. Repéré à : <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Acc%C3%A9l%C3%A9rom%C3%A8tre&oldid=223448063>
- [15] “Gyroscope,” mars 2025, page Version ID : 224168648. [En ligne]. Repéré à : <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Gyroscope&oldid=224168648>
- [16] “The Difference Between Classic Bluetooth and Bluetooth Low Energy.” [En ligne]. Repéré à : <https://blog.nordicsemi.com/getconnected/the-difference-between-classic-bluetooth-and-bluetooth-low-energy>
- [17] “Bluetooth® Mesh Networking,” juin 2025. [En ligne]. Repéré à : <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/feature-enhancements/mesh/>

- [18] A. Yusoff, R. Crowder, L. Gilbert, et G. Wills, “A Conceptual Framework for Serious Games,” dans *2009 Ninth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies*, juillet 2009, pp. 21–23, iISSN : 2161-377X. [En ligne]. Repéré à : <https://ieeexplore.ieee.org/document/5194153>
- [19] C. Abt, *Serious Games*, ser. Viking compass book. Viking Press, 1970. [En ligne]. Repéré à : <https://books.google.fr/books?id=5z-QAAAAIAAJ>
- [20] F. Laamarti, M. Eid, et A. E. Saddik, “An overview of serious games,” *Int. J. Comput. Games Technol.*, vol. 2014, p. 11 :11, janvier 2014. [En ligne]. Repéré à : <https://dl.acm.org/doi/10.1155/2014/358152>
- [21] R. Garris, R. Ahlers, et J. E. Driskell, “Games, Motivation, and Learning : A Research and Practice Model,” *Simulation & Gaming*, vol. 33, n° 4, pp. 441–467, décembre 2002, publisher : SAGE Publications Inc. [En ligne]. Repéré à : <https://doi.org/10.1177/1046878102238607>
- [22] M. Sailer, J. U. Hense, S. K. Mayr, et H. Mandl, “How gamification motivates : An experimental study of the effects of specific game design elements on psychological need satisfaction,” *Computers in Human Behavior*, vol. 69, pp. 371–380, avril 2017. [En ligne]. Repéré à : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S074756321630855X>
- [23] L. P. Rieber, “Animation, incidental learning, and continuing motivation,” *Journal of Educational Psychology*, vol. 83, n° 3, pp. 318–328, 1991, place : US Publisher : American Psychological Association.
- [24] T. W. Malone et M. R. Lepper, “Making Learning Fun : A Taxonomy of Intrinsic Motivations for Learning,” dans *Aptitude, Learning, and Instruction*. Routledge, 1987, num Pages : 32.
- [25] R. Schmidt et T. Lee, *Motor Control and Learning : A Behavioral Emphasis*. Human Kinetics, 2011. [En ligne]. Repéré à : <https://books.google.ca/books?id=EmuimwEACAAJ>
- [26] M. Pezzera et N. A. Borghese, “Dynamic difficulty adjustment in exer-games for rehabilitation : a mixed approach,” dans *2020 IEEE 8th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH)*, août 2020, pp. 1–7, iISSN : 2573-3060. [En ligne]. Repéré à : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9201871>

- [27] B. E. R. Garcia, M. K. Crocomo, et K. O. Andrade, “Dynamic Difficulty Adjustment in a Whac-a-Mole like Game,” dans *2018 17th Brazilian Symposium on Computer Games and Digital Entertainment (SBGames)*, octobre 2018, pp. 88–888, iSSN : 2159-6662. [En ligne]. Repéré à : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8636900>
- [28] Y. Valencia, J. Majin, D. Guzmán, et J. Londoño, “Dynamic Difficulty Adjustment in Virtual Reality Applications for Upper Limb Rehabilitation,” dans *2018 IEEE 2nd Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA)*, novembre 2018, pp. 1–6. [En ligne]. Repéré à : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8588126>
- [29] K.-L. Liao, M. Huang, J. Shi, M. Chen, et R. Yang, “Focus-Driven Augmented Feedback : Enhancing Focus and Maintaining Engagement in Upper Limb Virtual Reality Rehabilitation,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 31, n° 5, pp. 2653–2663, mai 2025. [En ligne]. Repéré à : <https://ieeexplore.ieee.org/document/10918855>
- [30] Z. Yang et B. Sun, “Hyper-Casual Endless Game Based Dynamic Difficulty Adjustment System For Players Replay Ability,” dans *2020 IEEE Intl Conf on Parallel & Distributed Processing with Applications, Big Data & Cloud Computing, Sustainable Computing & Communications, Social Computing & Networking (ISPA/BDCLOUD/SocialCom/SustainCom)*, décembre 2020, pp. 860–866. [En ligne]. Repéré à : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9443831>
- [31] A. Isabelle, F. Muhla, M. Ammi, Y. Francillette, E. Desailly, et B. A. Menelas, “An adaptive therapeutic serious game using connected toys for pediatric cerebral palsy rehabilitation,” 2025.