

Se rééduquer après un AVC en jouant à un jeu vidéo : la neuroréhabilitation 2.0

Réalité virtuelle, traitement du signal cérébral et apprentissage par renforcement en rééducation

Pinel Baudelaire T. DAHOUI

Data Scientist & IA | Ingénieur en Travaux Statistiques
tpineldahoui@gmail.com | github.com/Baudelaire12

28 Avril 2026

Série LinkedIn STEM au Quotidien — Jour 30/40

Plan de la présentation

- 1 Mise en contexte
- 2 Concepts clés
- 3 Développement mathématique
- 4 Cas pratique
- 5 Conclusion
- 6 Références

L'AVC : première cause de handicap moteur acquis

Chiffre clé

L'AVC (Accident Vasculaire Cérébral) est la **2ème cause mondiale de décès** et la **1ère cause de handicap acquis** touchant 15 millions de personnes chaque année (OMS, 2022). En Afrique subsaharienne, l'incidence des AVC augmente rapidement : le Bénin enregistre environ **40 à 60 AVC pour 100 000 habitants/an** (CNHU-HKM, estimation 2021).

- La rééducation post-AVC doit être **intensive et répétitive** pour stimuler la neuroplasticité.
- La réalité virtuelle (RV) permet d'effectuer **300 à 600 répétitions** par séance de 30 min contre seulement **30 à 50** en rééducation conventionnelle (Lohse et al., 2014).

Question centrale

Comment les algorithmes de traitement du signal, de feedback adaptatif et d'apprentissage par renforcement transforment-ils la rééducation en une expérience immersive et objectivement mesurée ?

Les piliers technologiques de la neuroréhabilitation par RV

1. Capture du mouvement :

Capteurs IMU (accéléromètre + gyroscope + magnétomètre), gants de données, combinaisons de capture de mouvement → mesure précise des trajectoires, angles articulaires, force.

2. Environnement virtuel adaptatif :

Moteur 3D (Unity, Unreal) + casque VR (Meta Quest, HTC Vive) → immersion + rétroaction visuelle en temps réel.

3. Interface cerveau-machine (BCI) :

EEG (électroencéphalographie) capte les signaux d'intention motrice → déclenche des mouvements dans l'avatar avant le membre réel.

Neuroplasticité

Capacité du cerveau à réorganiser ses connexions neuronales après une lésion. La RV exploite ce mécanisme en créant des boucles sensorimotrices répétitives qui stimulent la reformation des voies corticospinales endommagées.

Traitement du signal EEG — Ondelettes et classification

Signal EEG brut : $x(t)$ — transformée en ondelettes continues (CWT) :

$$W_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt$$

où a = échelle (fréquence), b = translation (temps), ψ = ondelette mère (ex. : Morlet).

Rythmes cérébraux d'intérêt en rééducation motrice :

Rythme	Fréquence	Rôle	Signal cible
Mu (μ)	8–12 Hz	Motricité	Désynchronisation à l'intention
Bêta (β)	13–30 Hz	Contrôle moteur	Suppression au mouvement
Gamma (γ)	30–100 Hz	Traitement fin	Activité corticale locale

Classifier l'intention motrice (BCI) — LDA ou SVM :

$$\hat{y} = \text{sign}\left(\mathbf{w}^T \phi(x) + b\right), \quad \phi(x) = \text{CSP features (Common Spatial Pattern)}$$

Formulation MDP (Markov Decision Process) pour la rééducation adaptative :

- **État** s_t : performance actuelle du patient (précision, fluidité, fatigue estimée)
- **Action** a_t : ajustement de la difficulté (vitesse cible, amplitude, tolérance d'erreur)
- **Récompense** r_t : +1 si le patient est en zone de défi optimal (Vygotsky), 0 sinon

Q-learning (Watkins, 1989) :

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha \left[r_t + \gamma \max_{a'} Q(s_{t+1}, a') - Q(s_t, a_t) \right]$$

Score de performance motrice — indicateur cinématique :

$$\text{SmoothScore} = 1 - \frac{\text{NbPics de jerk}}{\text{Durée du mouvement}}, \quad \text{jerk} = \frac{d^3 \mathbf{r}}{dt^3}$$

(Le jerk — dérivée 3ème de la position — mesure la fluidité du mouvement)

Cas pratique : MindMaze & études cliniques RV post-AVC

MindMaze (Suisse) — leader mondial de la neuroréhabilitation VR

MindMaze a obtenu la certification FDA (États-Unis) et CE (Europe) pour ses systèmes de rééducation VR post-AVC. Leur plateforme **MindMotion PRO** est déployée dans plus de **130 hôpitaux** dans 25 pays.

Méta-analyse (Laver et al., Cochrane Review, 2017 — 72 essais, 2470 patients) :

Résultat	RV vs. rééducation conventionnelle	Signification
Fonction membre supérieur	+0.28 (SMD)	$p < 0.05$
Activités quotidiennes (ADL)	+0.25 (SMD)	$p < 0.05$
Adhésion au traitement	+35% séances complétées	$p < 0.01$
Douleur perçue	−22% (EVA)	$p < 0.05$

Bénin : Le CNHU-HKM de Cotonou dispose d'un service de neurologie et de rééducation. Des systèmes VR low-cost (smartphone + cardboard + capteurs IMU à 30 \$) permettraient d'initier des protocoles de neuroréhabilitation accessibles.

Synthèse

La réalité virtuelle transforme la rééducation en combinant immersion, répétition intensive et feedback adaptatif piloté par algorithmes. Elle rend le patient acteur de sa guérison et permet une quantification objective des progrès — impossible en rééducation traditionnelle.

Perspectives africaines :

- Développement de protocoles VR low-cost pour la rééducation post-AVC au CNHU-HKM Cotonou
- Formation des kinésithérapeutes et neurologues africains aux outils de neuroréhabilitation digitale
- Télérééducation via smartphone pour les patients en zones rurales (faible connectivité)
- Extension à la rééducation des traumatismes de la route — 1ère cause de handicap acquis en Afrique

« Le cerveau ne se répare pas — il se réorganise. La réalité virtuelle lui donne les outils pour le faire plus vite et mieux. »

Références bibliographiques

-  Laver, K. E., et al. (2017). Virtual reality for stroke rehabilitation. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 11, CD008349.
-  Lohse, K. R., Hilderman, C. G. E., Cheung, K. L., Tatla, S., & Van der Loos, H. F. M. (2014). Virtual reality therapy for adults post-stroke. *PLoS ONE*, 9(3), e93318.
-  Watkins, C. J. C. H. (1989). *Learning from delayed rewards*. PhD thesis, University of Cambridge.
-  Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G., & Vaughan, T. M. (2002). Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, 113(6), 767–791.
-  World Health Organization. (2022). *Global Health Estimates — Top 10 causes of death*. WHO.
-  Hogan, N., et al. (2006). Motions or muscles? Some behavioral factors underlying robotic assistance of motor recovery. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 43(5), 605–618.

Merci pour votre attention

Pinel Baudelaire T. DAHOUI

Data Scientist & IA | Ingénieur en Travaux Statistiques

`tpineldahoui@gmail.com | github.com/Baudelaire12`

LinkedIn : @Pinel Baudelaire DAHOUI

Série STEM au Quotidien — 40 jours