université PARIS-SACLAY | FACULTÉ DES SCIENCES DU SPORT

Modèle bio-inspiré de la commande du bras dans une tâche de jonglerie

Isabelle Siegler[1,2], Guillaume Avrin[1,2,3], Maria Makarov[3], Pedro Rodriguez-Ayerbe[3]

[1]CIAMS, Université Paris-Saclay, Orsay, France

[2]CIAMS, Université d'Orléans, Orléans, France

[3]Laboratoire des Signaux et Systèmes (L2S), Université Paris-Saclay, France

Interdisciplinarité

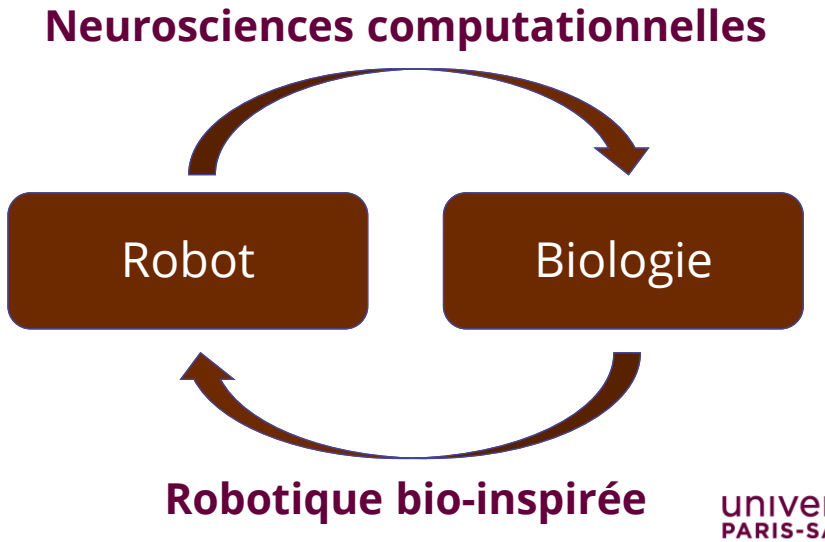
Quel paradigme de contrôle utilisé par l'homme et absent des architectures de contrôle traditionnellement utilisées en robotique ?

Humain

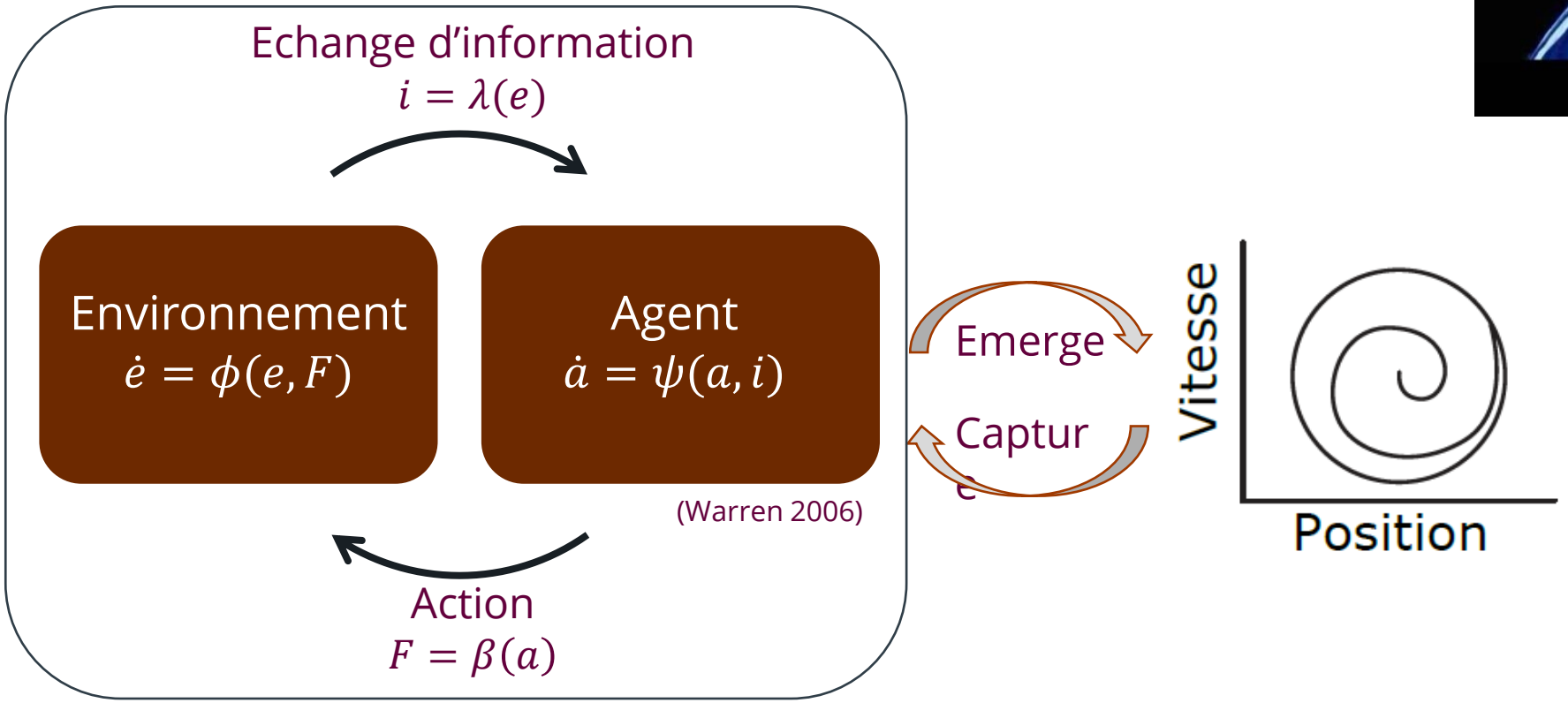
NAO :
- **Peu couteux**
- **Peu biomimétique**

Atlas :
- **Couteux**
- **Biomimétique**

Humain :
- Nombreux degrés de liberté
- Entrées sensorielles imparfaites
- Environnement non prédictibles
- Nombreuses dynamiques non-linéaires
- Régimes de stabilité multiples



Dynamiques comportementales



Réseaux spinaux rythmiques (CPG)

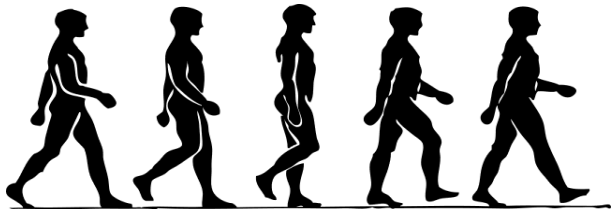
Capables de générer des patterns d'activation rythmique en l'absence d'entrée sensorielle :

Contrôle supra-spinal

Module l'activité des CPG

CPG

- Réseaux de neurones dans la moelle épinière
- Activités musculaires rythmiques



Marche, respiration, nage etc.

Système sensoriel

Adaptent la marche au contraintes extérieurs

Existence des CPG démontrée chez de nombreux animaux (lamproie, salamandre, chat) et fortement suggérée chez l'humain (revue : Guertin 2013).

Synchronisation intermittente ou continue ?

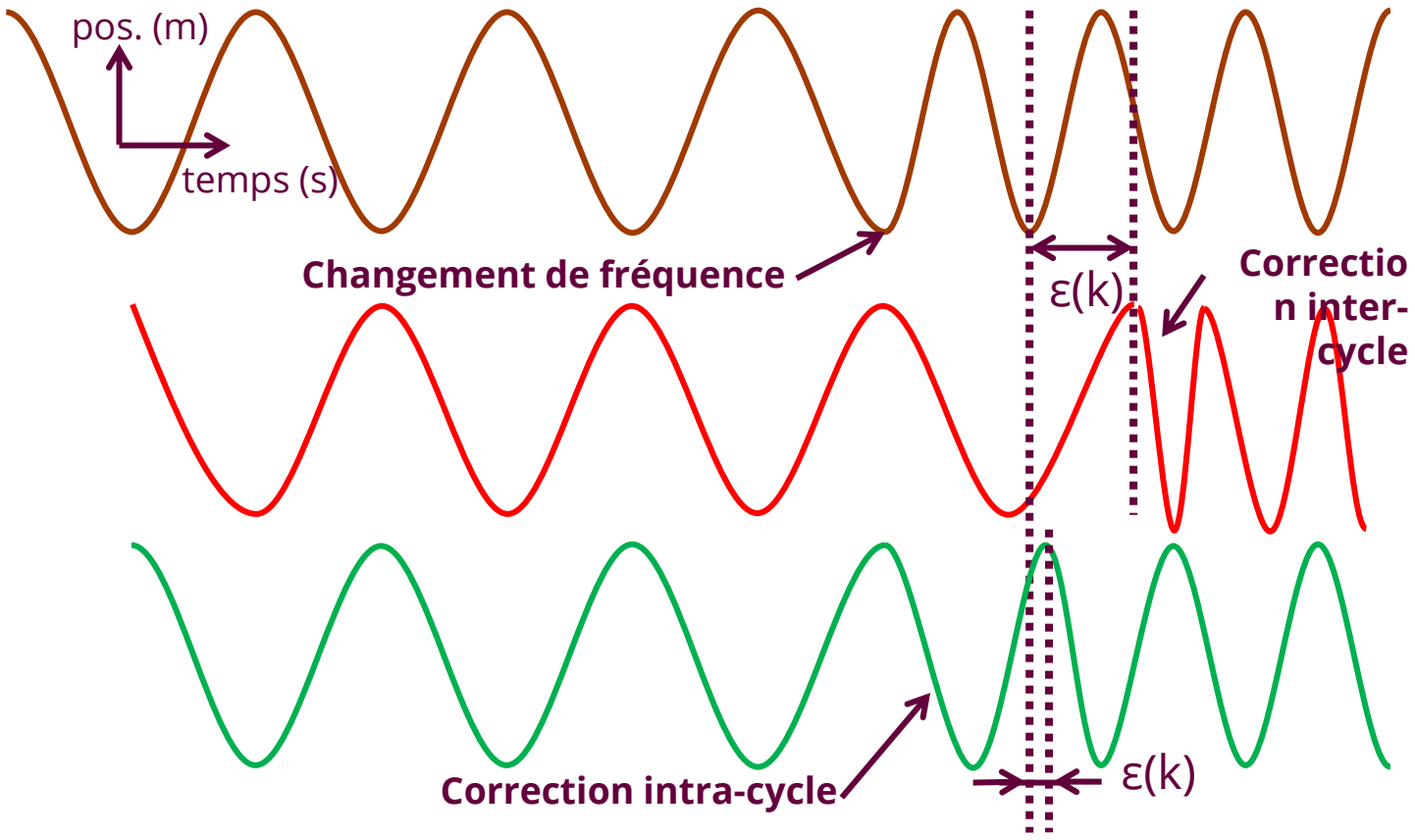
Les couplages impliqués dans le contrôle temporel de tâches rythmiques sont-ils intermittents ou continus ?

Stimulus visuel oscillant
(ex : balle rebondissant)
(Gan et al. 2015)

Couplage intermittent

Couplage continu

- Adaptation en ligne d'un mouvement de pointage (Cameron et al. 2011)
- Détérioration de la performance si occlusion d'une partie du mouvement (Zhao et Warren 2015)



Tâche de synchronisation sensorimotrice
(ex: *finger tapping)*

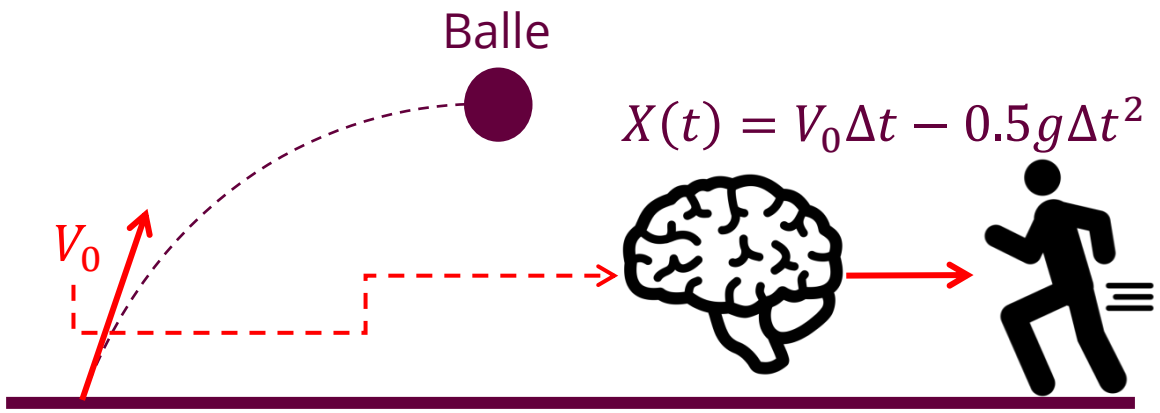
Contrôle prospectif ou prédictif ?

Quelle stratégie de contrôle sous-tend l'interception de projectile ?

Contrôle prédictif

(Wolpert et Ghahramani 2000).

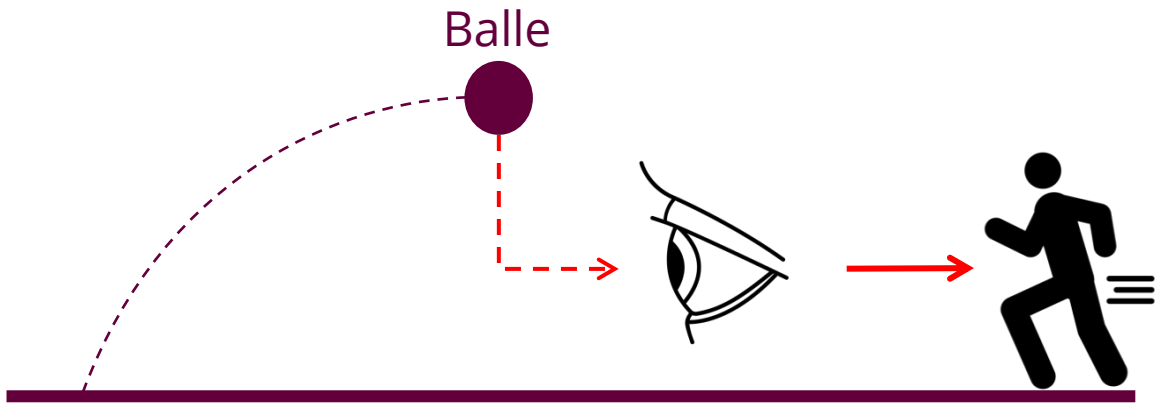
« Modèle interne » (représentation) de la gravité



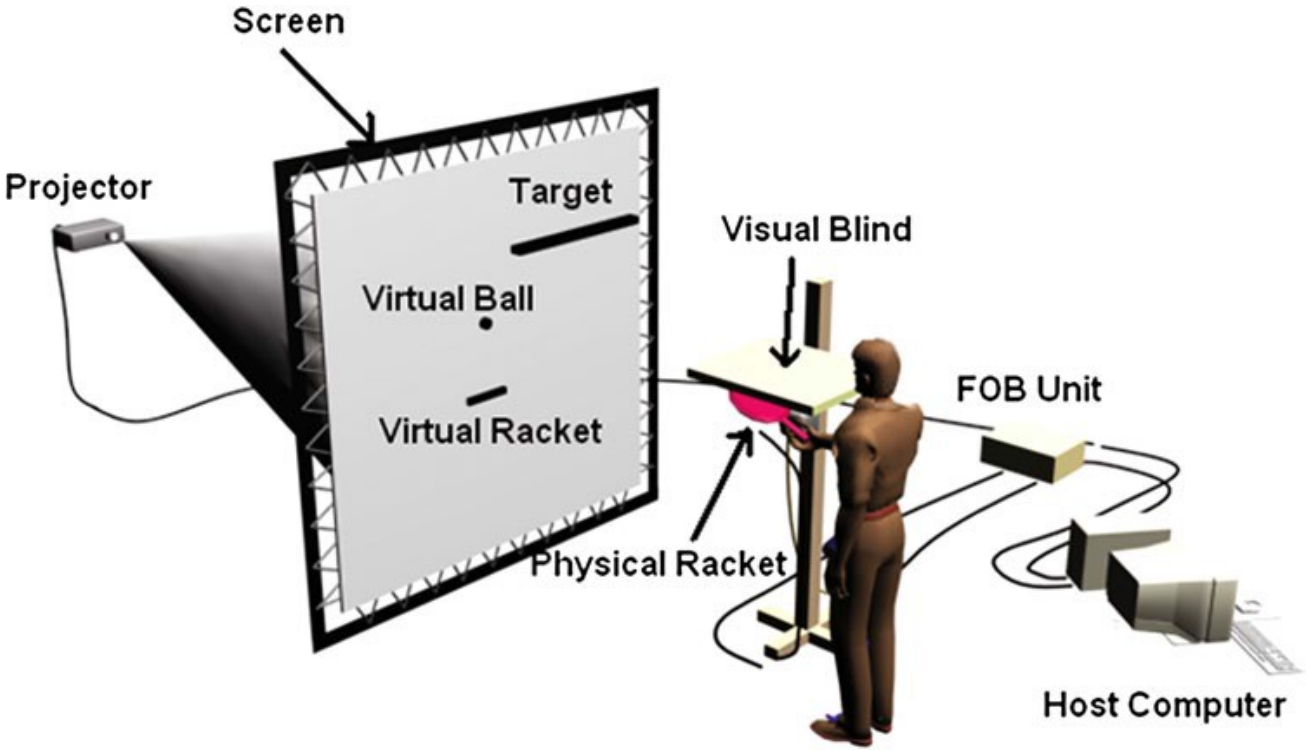
Couplage prospectif

- Perception directe / Approche écologique (Gibson 1958, 1979)
- Détection du taux d'expansion de projectile (Lee 2011)

Pas de « modèle interne » de la gravité



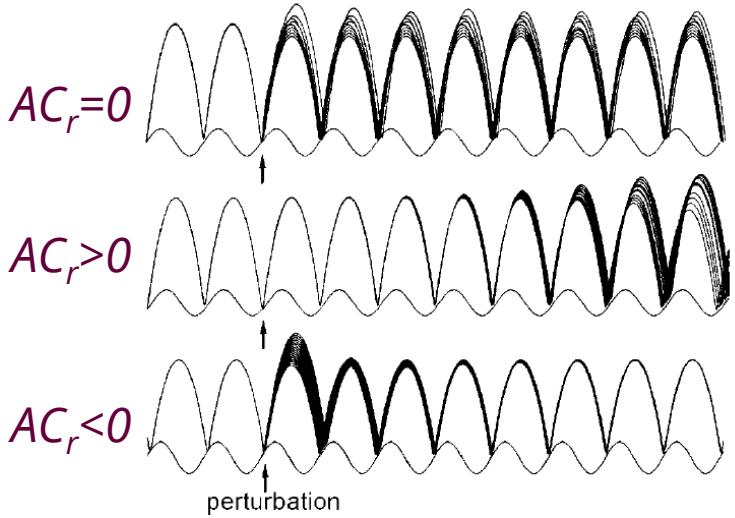
Frappe cyclique de balle

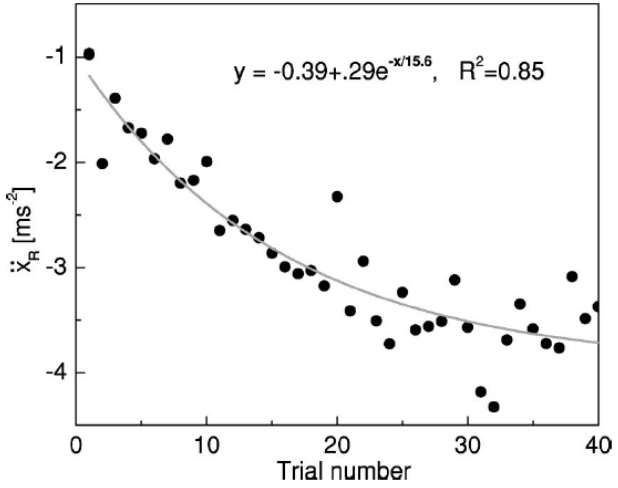


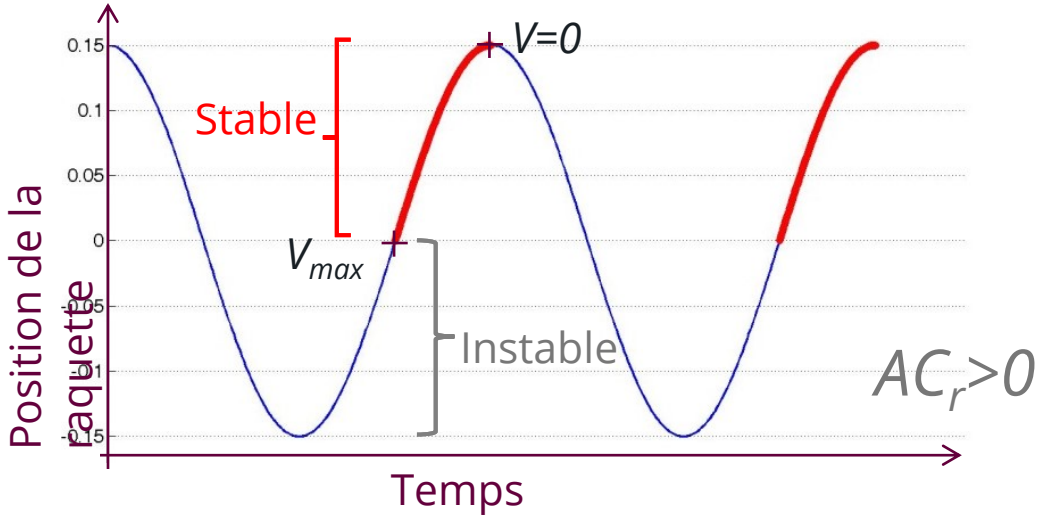
(Siegler et al. 2010, 2013 ; Dijkstra et al. 2004)

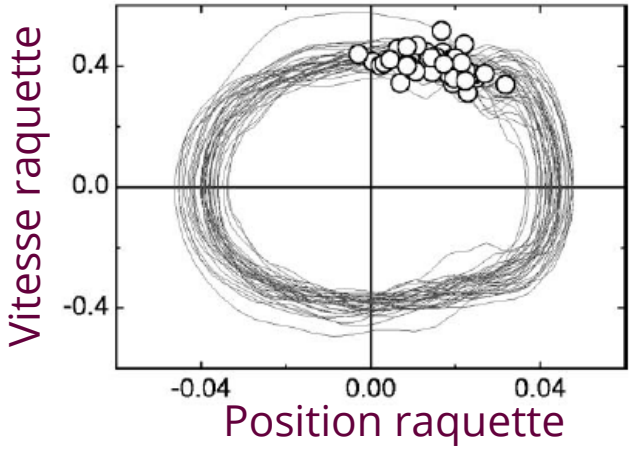
Régime de stabilité passive

Les participants frappent la balle à l'intérieur de la zone de stabilité passive $-2g(1+\alpha^2)/(1+\alpha)^2 < \ddot{X}_r < 0.$









Données expérimentales

Changement entre chaque essai

$g \in \{6{,}56 ; 8{,}10 ; 9{,}81 ; 11{,}66 ; 13{,}69\}$
$\alpha \in \{0{,}55 ; 0{,}52 ; 0{,}48 ; 0{,}45 ; 0{,}41\}$

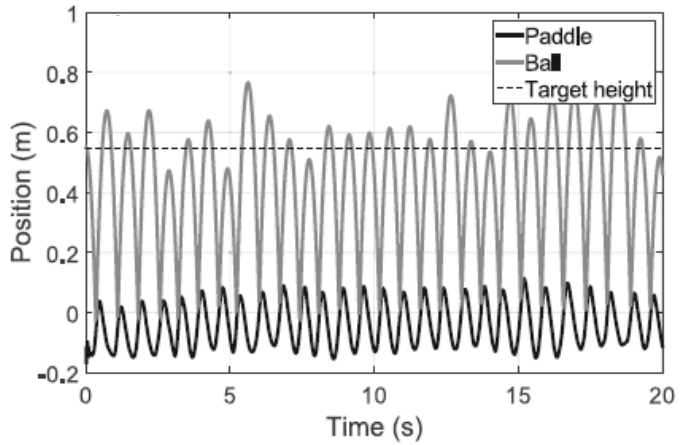
Essais avec perturbations permanentes

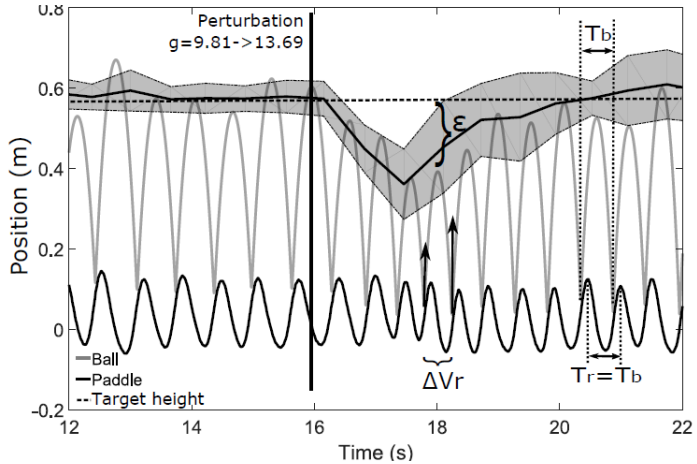
Perturbation de la g ou α au cours de l'essai.

$g : 9.81 \rightleftarrows 13{,}69 ; 9.81 \rightleftarrows 6{,}56 ; \ 9.81 \rightleftarrows 8{,}10 ; 9.81 \rightleftarrows 11{,}66$
$\alpha : \ 0.48 \rightleftarrows 0{,}55 ; 0.48 \rightleftarrows 0{,}52 ; 0.48 \rightleftarrows 0{,}45 ; 0.48 \rightleftarrows 0{,}41$

Essais avec perturbations ponctuelles

Au cours de l'essai, la gravité est modifiée pour seulement un cycle.

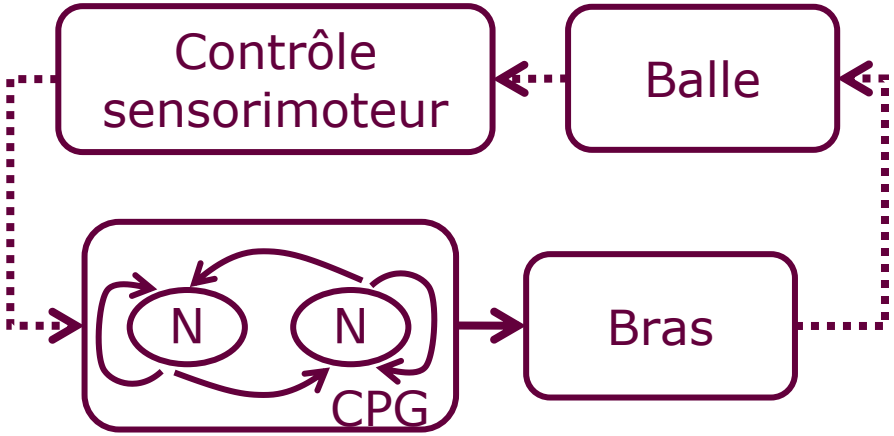




4502 perturbations

Quelle architecture de contrôle ?

La tâche de frappe cyclique de balle peut être contrôlée grâce à un oscillateur neuronal modulé sur la base de couplage sensorimoteur intermittent.



Hypothèses :

- Connaissance de l'acc. gravitationnelle
- Utilisation d'un modèle interne des trajectoires balistiques
- Existence d'un seuil d'activation pour le contrôle actif de la raquette

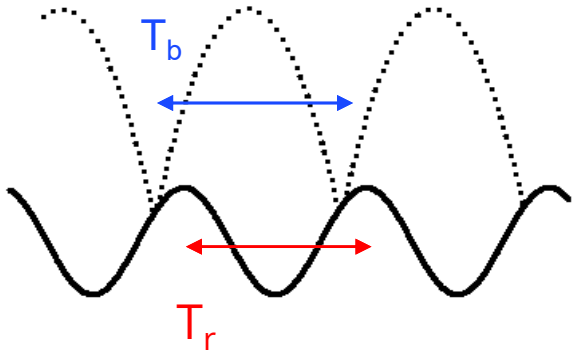
CPG (Rugy et al. 2003)

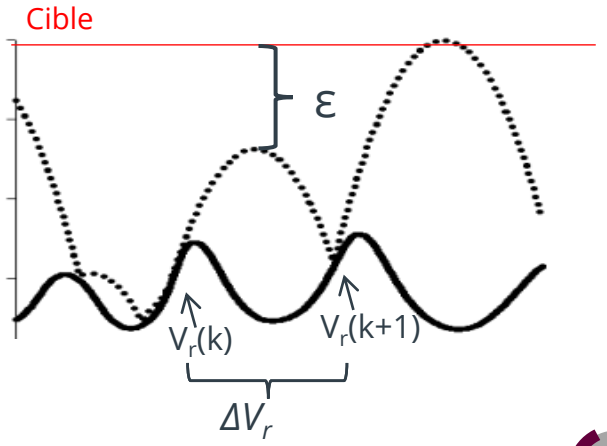
Architecture

Les trajectoires de raquette sont-elles générées par un CPG ?

Quel mode de contrôle ?

Le rebond est activement contrôlé avec des ajustements proportionnels aux amplitudes des perturbations.





Couplages perception-action :

$$T_r(k+1) = T_b(k+1)$$
$$\Delta V_r(k+1) = \lambda\varepsilon(k)$$

CPG (Rugy et al. 2003)

Architecture

Couplages perception-action (Siegler et al. 2010, 2013)

Signature

De quelle nature sont les couplages sensorimoteurs ?

Questions de recherche

Objectif : identifier les stratégies de contrôle des humains durant la réalisation de tâches rythmiques hybrides.

Q1. Les mouvements sont-ils générés par un CPG ?

Mouvement rythmique ?

Q2. Couplages intermittents ou continus ?

Modèles internes ?

Q3. Utilisation volontaire de la zone de stabilité passive ?

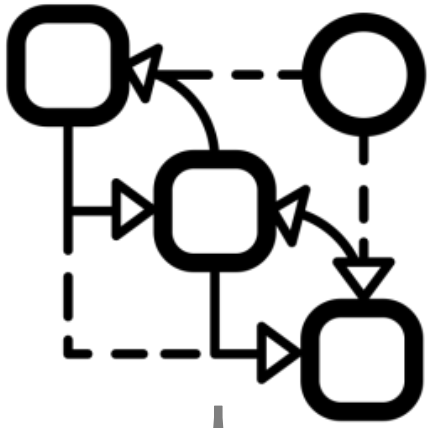
Contrôle actif ou émergent ?

Outils de l'automatique

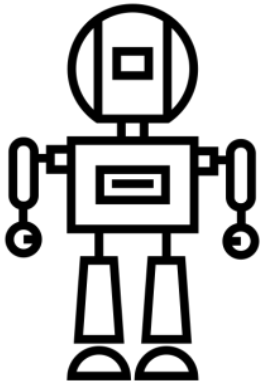
Des outils de l'automatique ont été utilisés pour le réglage, l'analyse et la validation de nos modèles.

Neurosciences

Automatique



Robotique



Réglage des paramètres

Métaheuristique

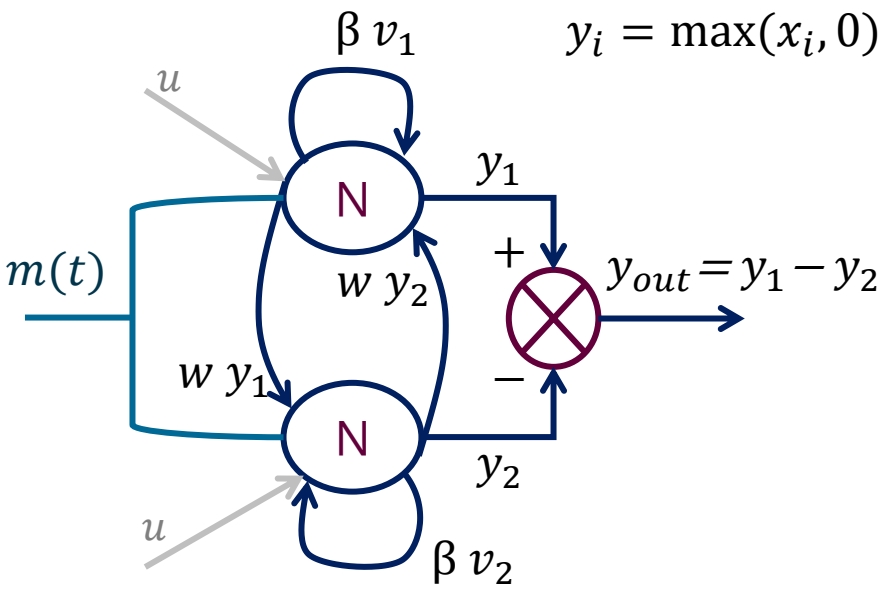
Analyse de stabilité

Application de Poincaré

Prédiction des cycles limites

Analyse du premier harmonique

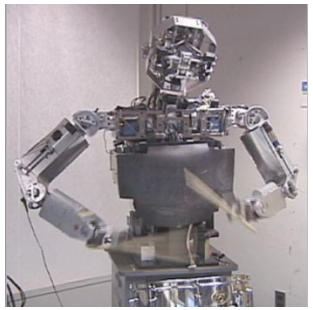
Oscillateur de Matsuoka



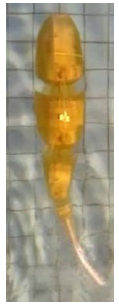
Caractéristiques de l'oscillateur

- Proposé dans Matsuoka et al. (1985)
- Bio-inspiré
- Niveau d'abstraction suffisant

Utilisation en robotique



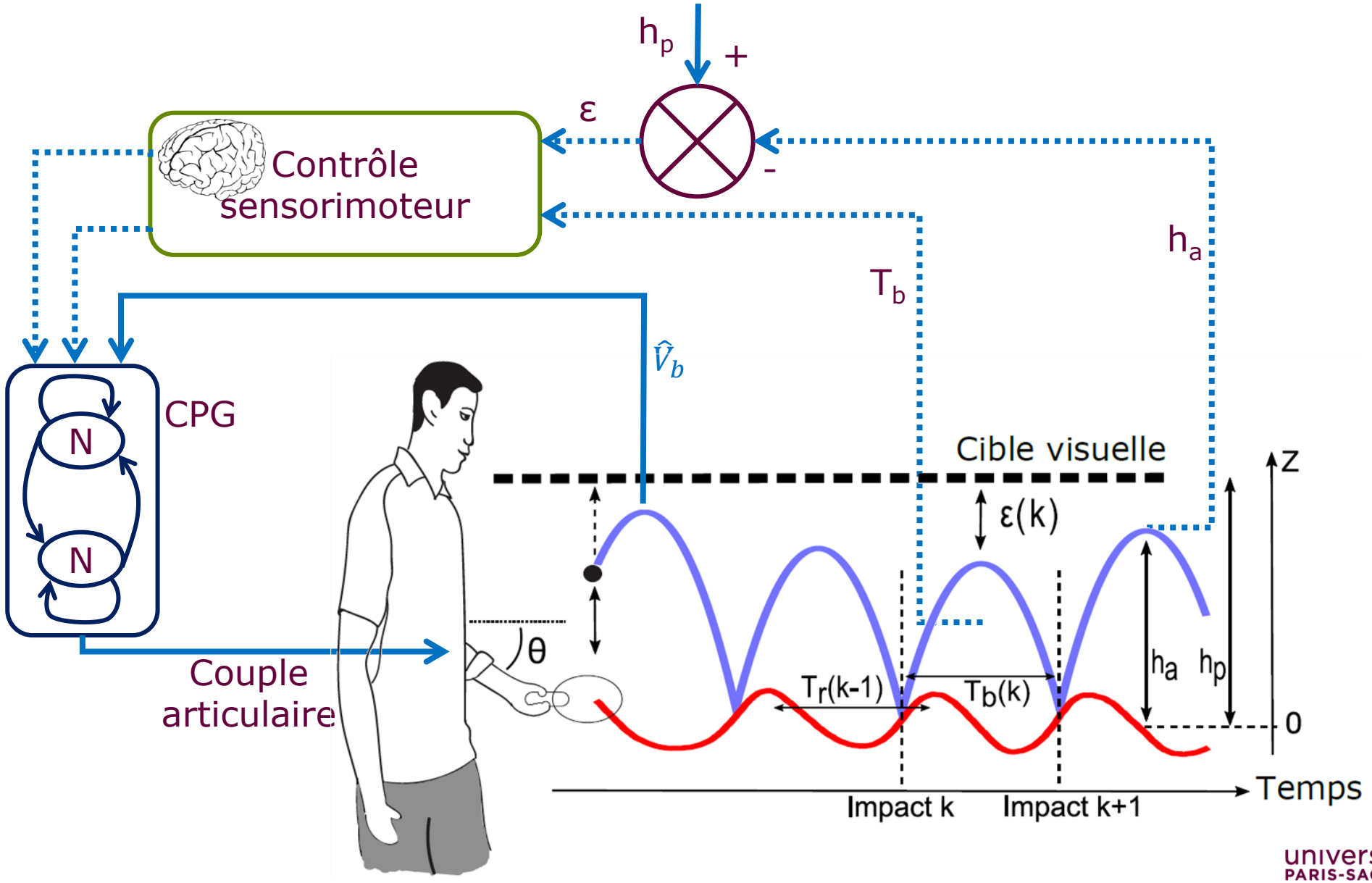
(Williamson et al. 1999)



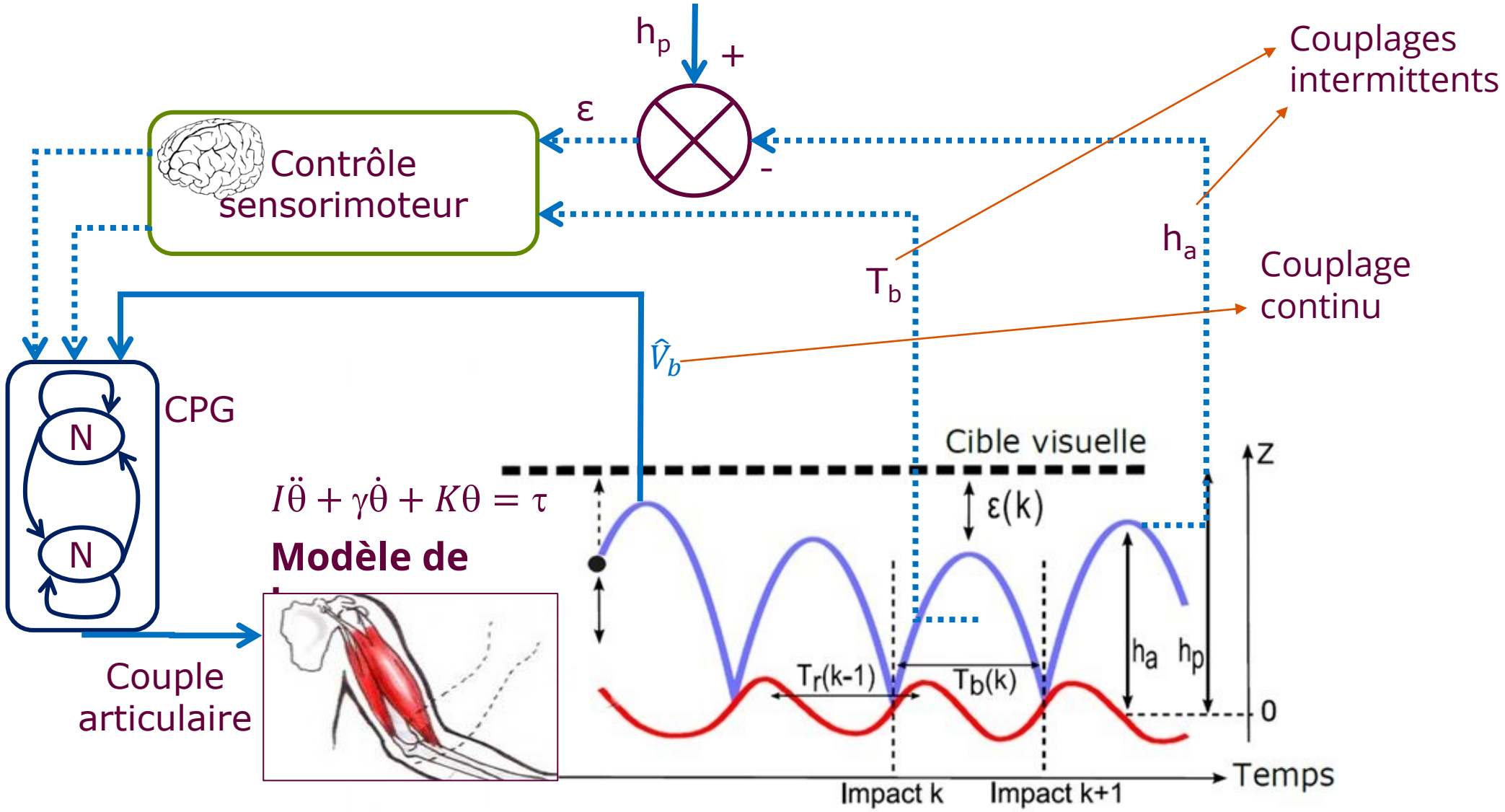
(Jeong et al. 2011)

(Fukuaoka et al. 2007)

Boucles de rétro-action sensorielles

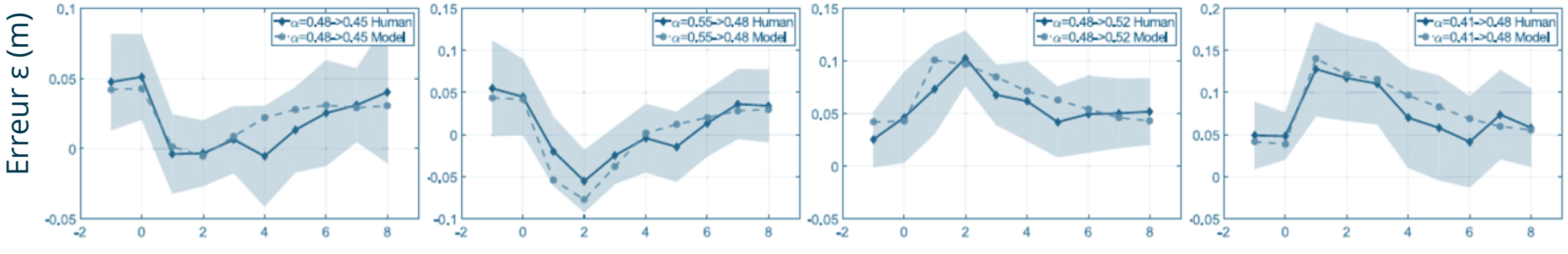


Boucles de rétro-action sensorielles

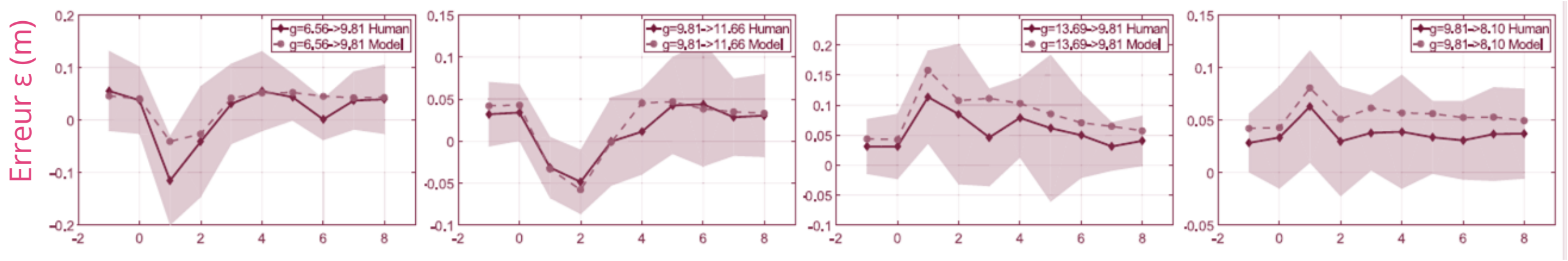


Validation du modèle

Modifications de



Modifications de g



Numéro du cycle

Contributions du modèle aux sciences du mouvement humain ?

Un modèle :

- comprenant un CPG
- avec une synchronisation sensorimotrice rendue possible par couplage visuomoteur continu,
- sans modèle interne de la gravité ou planification du mouvement,
- avec un contrôle émergent permettant une convergence vers la zone de stabilité passive,

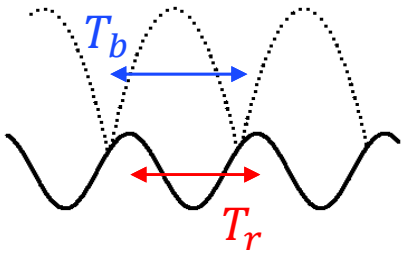
reproduit :

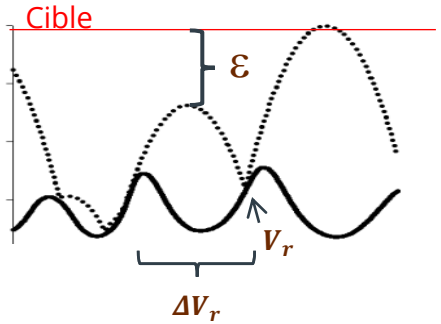
- les performances des participants en régime transitoire,
- les cycles limites des participants qui varient en fonction des conditions environnementales.

Poursuite du projet scientifique

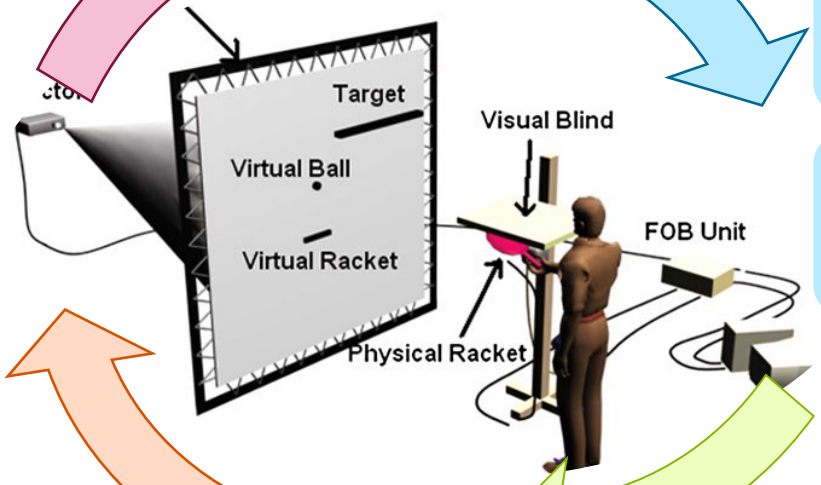
Couplages perception-action :

$$T_r(k+1) = T_b(k+1)$$
$$\Delta V_r(k+1) = \lambda\varepsilon(k)$$





CPG



Architecture de contrôle → **Réglage**

↓

Contrôle bio-inspiré de robots ← **Validation**

↓

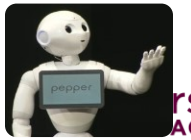
Compréhension du contrôle moteur humain

Généralisation à d'autres mouvements rythmiques

Algorithmes de contrôle innovants

↓

Mouvements rythmiques naturels



Merci de votre attention !

Bibliographie :

- Avrin G, Siegler IA, Makarov M, Rodriguez-Ayerbe P (2018). Model of rhythmic ball bouncing using a visually controlled neural oscillator. Biol Cyber, 112(6):509-522. doi: 10.1007/s00422-018-0776-8.
- Avrin G, Siegler IA, Makarov M, Rodriguez-Ayerbe P (2017). Model of rhythmic ball bouncing using a visually controlled neural oscillator. J. Neurophysiol., 118(4): 2470-2482 jn.00054.2017. https://doi.org/10.1152/jn.00054.2017
- Avrin G, Makarov M, Rodriguez-Ayerbe P, & Siegler IA (2017) Dynamic stability of repeated agent-environment interactions during the hybrid ball-bouncing task. Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO). Madrid (Spain): SciTePress; 2017. pp. 486–496. doi: 10.5220/0006428304860496. http://www.scitepress.org/Papers/2017/64283/64283.pdf
- Avrin G, Makarov M, Rodriguez-Ayerbe P, Siegler IA (2016) Particle swarm optimization of Matsuoka's oscillator parameters in human-like control of rhythmic movements. Proc IEEE American Control Conference (6 pages)