

TD2 : CIRCUITS NERVEUX GÉNÉRATEURS DE RYTHMES (CPG)

INTRODUCTION

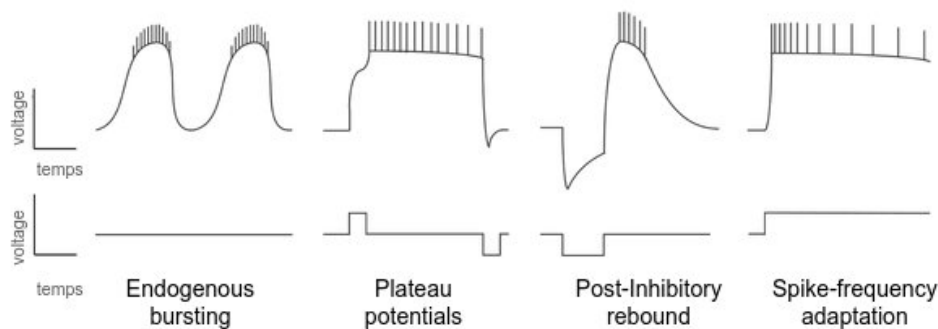
Ce TD vous propose une introduction aux circuits nerveux générateurs de rythmes (*central pattern generators*, CPG). Vous allez étudier le modèle phénoménologique proposé par Rowat et Selverston (1993) [1] dans le cadre de la recherche du contrôle de la mastication chez le homard. Les objectifs de cette formation sont :

- Comprendre le modèle du neurone generateur de rythme de Rowat-Selverston (RS).
- Comprendre le choix des paramètres du modèle conduisant à la reproduction de quelques propriétés intrinsèques observées de façon expérimentale.
- Étudier la synchronisation via synapses d'un réseau de neurones RS.
- Étudier le neurone RS dans un scénario de simulation en robotique sociale.

Le travail est organisé en trois parties. La Partie I vous propose d'étudier les paramètres intrinsèques du modèle RG. La Partie II vous propose l'étude de la synchronisation d'un réseau de neurones RS. La partie III vous propose de compléter la simulation du comportement de deux robots pour reproduire le comportement social de saluer ou « faire coucou ». Vous devez travailler en Python 3.

PARTIE I : LE NEURONE ROWAT-SELVERSTON (RS)

Exercice I.1. A partir de la lecture de l'article de Rowat et Selverston (1993) [1] (principalement la section *Methods : Cell model, Network connections* et *Model summary*), analyser l'effet des paramètres du modèle RS (τ_m , τ_s , A_f , σ_f , σ_s) de sorte à reproduire les quelques propriétés intrinsèques observés au niveau du potentiel de membrane (sans tenir compte de la production d'impulsions) sous les stimulations suivantes :



[Adapté de Marder & Bucher (2001)]

Voici la forme physiologique du modèle :

$$\frac{dV}{dt} = (I_s + I_{\text{syn}} + I_{\text{ej}} - I_{\text{fast}} - I_{\text{slow}})/\tau_m$$

$$\frac{dq}{dt} = (-q + \sigma_s V)/\tau_s$$

$$I_{\text{fast}} = V - A_f \tanh\left(\frac{\sigma_f}{A_f} V\right)$$

$$I_{\text{slow}} = q$$

dont

V : potentiel de membrane en mV

τ_m, τ_s : constantes de temps (resp. membrane, courant lent) en ms

A_f, σ_f, σ_s : paramètres du modèle

I_{fast} : courant rapide en mV

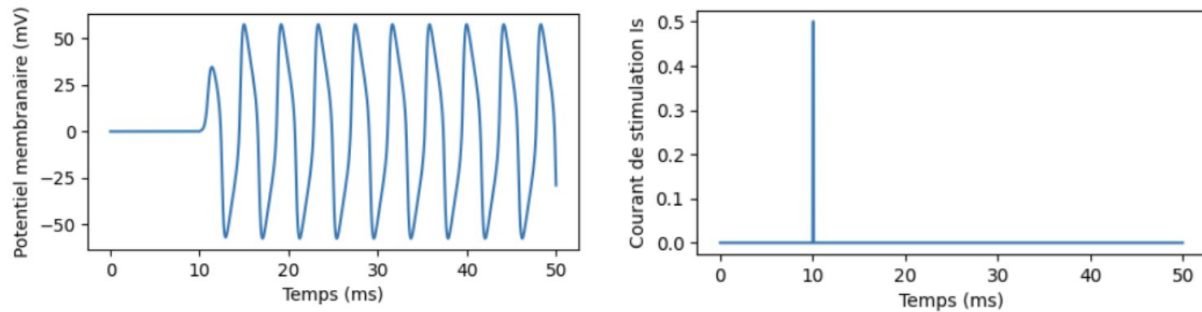
I_{slow} : courant lent en mV

I_{syn} : courant de synapses chimiques en mV

I_{ej} : courant de synapses électriques (jonctions électriques) en mV

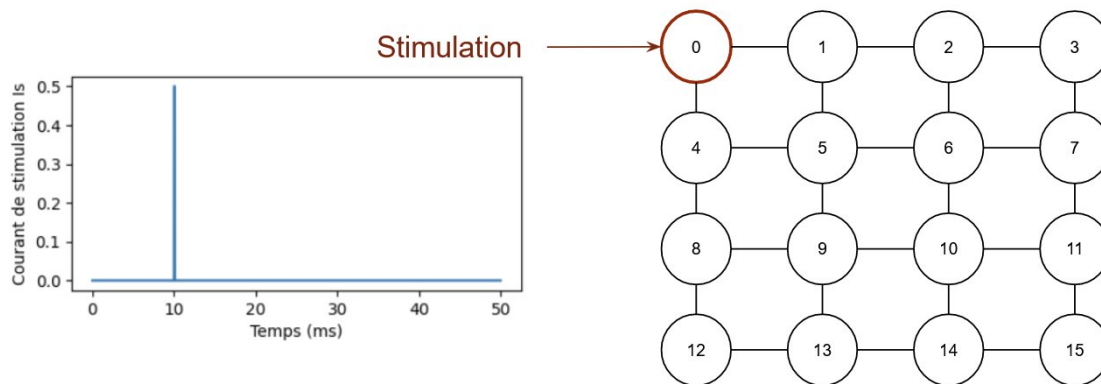
$$I_{\text{ej}} = \sum_{j=0}^{n-1} g_{\text{ej}} (V - V_{(j)})$$

Exemple de réponse à une stimulation d'impulsion ($\tau_m = 0.1666$, $\tau_s = 5.0$, $V_0 = q_0 = 0$)



PARTIE II : ETUDE DE LA SYNCHRONISATION VIA SYNAPSES

Vous allez à présent étudier l'effet de synchronisation d'un réseau de neurones. L'expérience suivante vous est proposée comme exemple :



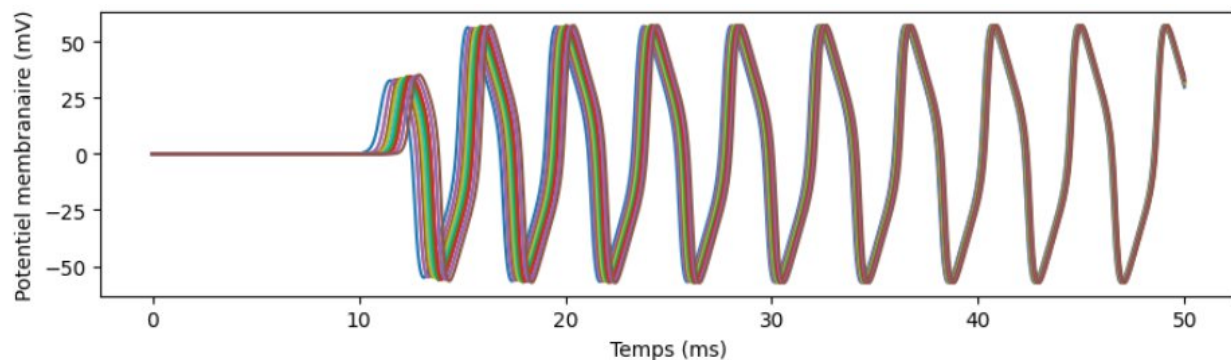
Exercice II.1. A partir de la stimulation impulsionnelle d'un seul neurone, illustrer la possibilité de synchronisation émergente du réseau (en phase ou anti-phase). Le choix du modèle de synapse vous appartient. Voici, un exemple de modèle de synapse électrique :

$$I_{ej} = \sum_{j=0}^{n-1} g_{ej} (V - V_{(j)})$$

avec

g_{ej} : conductance de jonction électrique

Étudier l'effet des synapses excitatrices et inhibitrices. Voici un exemple :



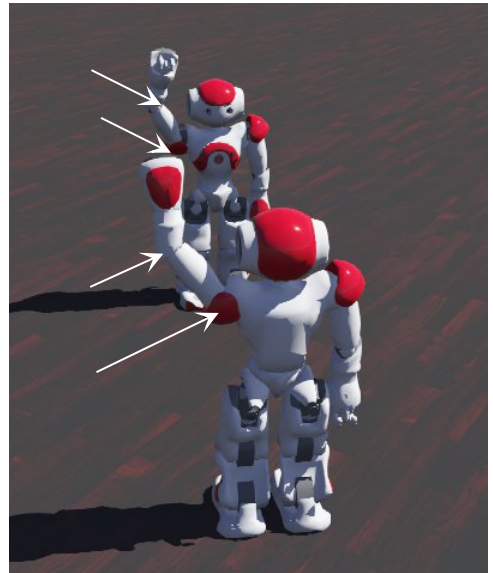
PARTIE III : SIMULATION DU GESTE DE « FAIRE COUCOU » (CPG)

Cette partie du TD vous propose une introduction au prototypage de circuits nerveux générateurs de rythmes (central pattern generators, ou CPG) pour des applications en robotique sociale.

Vous allez étudier la possibilité de synchronisation du geste de saluer ou « faire coucou » entre deux humanoïdes (le robot NAO vous est proposé comme exemple). Pour cela, le contrôle de l'articulation de l'épaule et du coude sera implémenté via le modèle du neurone RS.

Le scénario de simulation ainsi que le contrôleur unique pour réguler le comportement des deux robots (voir le fichier « coucou_controller.py », vous êtes libre de proposer une implémentation alternative) vous sont donnés comme point de départ en « TD2-III.ZIP » .

L'idée de la simulation est de permettre à chaque robot d'être stimulé par le geste de l'autre. Dans l'idéal, ce TD devrait contempler le traitement de la stimulation visuelle (par exemple, via le calcul du flux optique), visant à obtenir l'estimation du mouvement de l'autre. Cependant, cela augmenterait considérablement la complexité du travail. Ainsi, un capteur du type [GPS](#) a été fixé à chaque main des robots, de sorte à ce que chaque robot émette la position de sa main (par rapport à un référentiel fixe commun) et reçoit celle de l'autre via un réseau non filaire simulé. Vous êtes invité à explorer le script d'exemple pour comprendre le mécanisme de communication mis en place.



Architecture

Ce TD vous propose la simulation simplifiée du modèle biologique. Ainsi, à la place d'étudier le réseau constitué par les synapse entre les CPGs, les interneurons et les motoneurons, étant ces derniers connectés aux groupes d'actionnement d'extension et de flexion ; vous allez donner aux actionneurs de l'épaule et du coude le potentiel membrane du neurone RS comme consigne de référence. Voici l'architecture proposée :

$$I_s^{(\text{épaule})} = \dot{X}_{\text{GPS}}$$

$$I_{\text{syn}}^{(\text{épaule})} = I_{\text{syn}}^{(\text{coude})} = 0$$

$$I_{\text{ej}}^{(\text{épaule})} = I_s^{(\text{coude})} = 0$$

$$I_{\text{ej}}^{(\text{coude})} = g_{\text{ej}} (V^{(\text{coude})} - V^{(\text{épaule})})$$

Consigne en position pour les articulations du coude et de l'épaule

$$\phi^{(\text{épaule})}(t) = V^{(\text{épaule})}(t) + \phi_0^{(\text{épaule})}$$

$$\phi^{(\text{coude})}(t) = V^{(\text{coude})}(t) + \phi_0^{(\text{coude})}$$

où ϕ_0 est le centre d'oscillation de l'articulation

LE TRAVAIL À RENDRE

Pour la partie I et II, répondre aux questions et exercices proposés dans un cahier *jupyter notebook* nommé *TD2-I-II.ipynb*.

Pour la partie III, vous devez rendre les sources de votre simulation en format ZIP (de façon analogue au fichier TD2-III.zip d'exemple). Préparer également un compte rendu en format PDF pour justifier vos choix effectués permettant la mise en place du modèle et la présentation de vos résultats à l'aide de quelques figures.

Vous avez donc à rendre 3 fichiers sur Arche.

CONDITIONNEMENT

Travail individuel à rendre au plus tard le vendredi 30 janvier 2026 avant minuit.

RÉFÉRENCES

- [1] Rowat, P. F., & Selverston, A. I. (1993). Modeling the gastric mill central pattern generator of the lobster with a relaxation-oscillator network. *Journal of neurophysiology*, 70(3), 1030-1053.
- [2] Marder, E., & Bucher, D. (2001). Central pattern generators and the control of rhythmic movements. *Current biology*, 11(23), R986-R996.