Travaux dirigés de Neurosciences Computationnelles

Université Paris Descartes

2016-2017

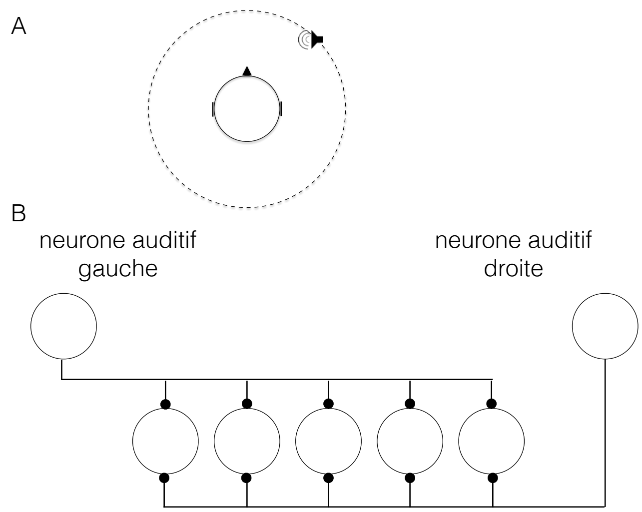

FIGURE 1 – Localisation de source. A. Schéma du problème. B. Ligne de délai.

1 Les trois niveaux d'analyse de David Marr

Pour comprendre les liens entre biologie et psychologie, David Marr (1945-1980) a proposé d'analyser les phénomènes cognitifs en définissant trois niveaux :

1. le niveau computationel, i.e. quel problème le cerveau résout-il ?
2. le niveau algorithmique, i.e. quel algorithme particulier est mis en place pour résoudre le problème.
3. le niveau physique, i.e. sur quel système biologique l'algorithme est-il mis en place.

Ici on considère un exemple simplifié pour illustrer ces trois niveaux d'analyse. On considère une tâche simple, pour laquelle le niveau computationel est le suivant : détecter la position angulaire d'une source sonore (située à une distance fixe du récepteur), comme illustré sur la figure 1.

On fait l'hypothèse qu'un signal sonore se propage en ligne droite jusqu'aux deux oreilles à une vitesse v, calculez le temps de parcours pour chacune des deux oreilles. On commencera par paramétrer le problème.

Sachant que le signal reçu par chaque oreille est une série temporelle, proposez un algorithme qui permettrait de trouver la position angulaire de la

source.
On propose le schéma neuronal suivant pour implémenter un algorithme de localisation de source, expliquez comment cette structure permet d'implémenter l'algorithme proposé (NB : l'activité d'un neurone se propage le long de l'axone avec une vitesse finie).

2 Introduction au modèle de neurone Intègre-et-Tire avec fuite (Leaky Integrate-and-Fire, LIF)

On considère le modèle intègre-et-tire pour lequel le potentiel de membrane V obéit à

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{V}{\tau} + I(t) \tag{1}$$

pour des potentiels de membrane inférieurs au seuil de déclenchement $V < V_{th}$. Lorsque $V = V_{th}$ le neurone émet un potentiel d'action, et le potentiel est remis à $V = 0$.

Expliquez pourquoi ce modèle est appelé **Intègre-et-Tire**, et avec **fuite**.

On considère un potentiel d'action pré-synaptique qui produit le courant

$$I(t > 0) = w \exp(-\frac{t}{\tau_s}) \tag{2}$$

avec $\tau_s > \tau$ et $V(t = 0) = 0$. Calculez la réponse du neurone (on fera l'hypothèse que le potentiel de membrane reste sous le seuil de déclenchement).

Lors des expériences en tranche, on peut contrôler le courant reçu par le neurone. Un protocole typique consiste à envoyer un courant **constant**, puis de mesurer la fréquence de décharge du neurone. Comment peut-on définir la fréquence de décharge d'un neurone ? Calculez, la fréquence de décharge d'un neurone intègre et tire pour un courant constant I_0. Discutez le comportement pour I_0 grand. Sur la figure 2 on montre une courbe $f - I$ obtenue expérimentalement. Quelle différence remarquez vous par rapport à la courbe correspondant au modèle Intègre-et-Tire ?

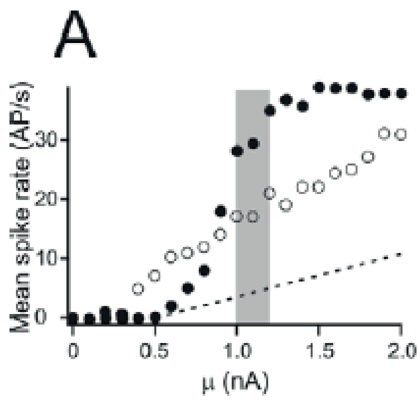

FIGURE 2 – Points noirs : courbe courant-fréquence pour un neurone du cortex somato-sensoriel du rat.

Pour résoudre le problème dans le régime $I_0 \gg 1$, on introduit une période réfractaire τ_r dans le modèle : pour un potentiel d'action émis au temps t_{PA}, on a maintenant $V([t_{PA}, t_{PA} + \tau_r]) = 0$.

Comment peut-on interpréter cette période réfractaire en terme de phénomène biologique ? Calculez et tracez la courbe courant-fréquence pour le modèle avec période réfractaire.

2.1 Plasticité dépendant des temps des P.A. (ou STDP, pour Spike-timing dependent plasticity)

On considère une synapse connectant deux neurones (depuis un neurone pré-synaptique vers un neurone post-synaptique). Le neurone pré-synaptique émet un train de n_{pre} potentiels d'action (PA) $(t_{\text{pre},1}, t_{\text{pre},2}, \ldots, t_{\text{pre},n_{pre}})$, tandis que le neurone post-synaptique émet un train de n_{post} PA $(t_{\text{post},1}, t_{\text{post},2}, \ldots t_{\text{post},n_{post}})$. Faites un schéma de la situation. Le poids synaptique w est modifié selon la règle suivante : chaque paire de PA *plus proche voisin* induit une modification $\Delta w = f(t_{\text{post},j} - t_{\text{pre},i})$ avec

$$\begin{aligned} f(s) = &\quad A^+ e^{-s/\tau^+} \quad \text{si } s \geq 0 \\ = &\quad -A^- e^{s/\tau^-} \quad \text{si } s < 0 \end{aligned}$$

où A^+, A^-, τ^+ et τ^- sont des nombres réels positifs. Des paires de PA sont considérées *plus proche voisin* si et seulement si il n'y a aucun autre PA (pre- or post-synaptique) dans l'intervalle entre les deux PA $]t_{\text{pre},i}, t_{\text{post},j}[$ (ou $]t_{\text{post},j}, t_{\text{pre},i}[$). La modification synaptique (de w) est la somme de toutes les modifications induites pour toutes les paires de PA *plus proche voisin*.

1. On suppose d'abord que les deux neurones émettent n PA de manière périodique à une fréquence $F = 1/T$ (où T est l'intervalle de temps entre deux potentiels d'action), avec un intervalle fixe Δt entre les PA post- et pre-, $\Delta t = t_{\text{post},i} - t_{\text{pre},i}$ pour tout $i = 1, \ldots n$.
   - Faites un dessin des deux trains de PA.
   - Calculez la modification synaptique totale W induite par ces deux trains de PA. On fera le calcul pour $\Delta t > 0$ et $\Delta t < 0$.
   - Calculez la modification synaptique totale W lorsque l'intervalle entre PA T est très grand devant la taille des fenêtres de STDP τ^+ et τ^-, et Δt. Tracez à la main la manière dont W dépend de Δt.
   - Calculez la modification synaptique lorsque T et Δt sont très petits devant les tailles de fenêtre de STDP. Tracez à nouveau la manière dont W dépend de Δt.
2. On considère à présent des trains de PA aléatoires, générés comme suit : les PA pour l'ensemble des 2 neurones sont générés par un processus de Poisson avec une fréquence $F = 1/T$. Ensuite chaque PA est assigné à un neurone de manière alternée : le 1er PA au neurone

pre-, le 2nd au neurone post, le 3ième au neurone pre-, etc. Au total, $2n$ PA sont générés, n par neurone.

— Quelles sont les propriétés d'un processus de Poisson ? En particulier, quelle est la distribution des intervalles entre PA ?
— Quelle est la moyenne de la modification synaptique totale W à la fin du train de PA ? On l'exprimera en fonction de n, F, A^+, A^-, τ^+ and τ^-.
— Quelles sont les limites de W pour des basses ($F \to 0$) et hautes ($F \to \infty$) fréquences ?
— Est-il possible pour la modification synaptique totale d'être négative à basse fréquence et positive à haute fréquence ? Ecrivez les conditions sur les paramètres pour obtenir un tel résultat. Dessinez à la main la forme de la fonction f lorsque ces conditions sont satisfaites. Exprimez la fréquence à laquelle la modification synaptique totale W change de signe.