

Modélisation de Populations Neuronales pour l'Intégration Visuo-motrice: Dynamiques et Décisions

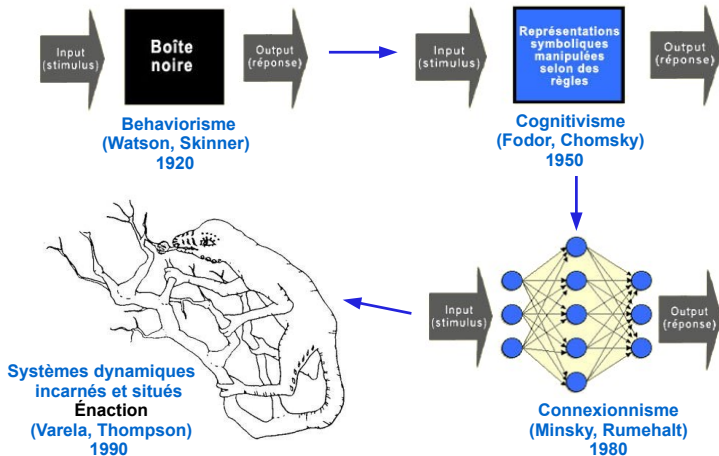
Wahiba TAOUALI

Thèse présentée le 26 septembre 2012

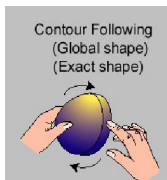


Les sciences cognitives:

→ Description, explication et simulation des mécanismes mentaux.

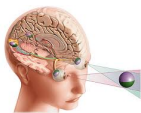


L'énaction: l'action dans la perception



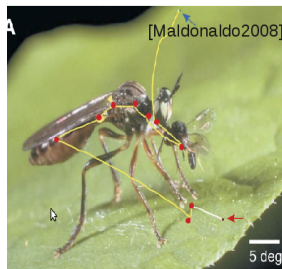
“**Perception** is not something that happens to us, or in us, it is something **we do**.”

A. Noë, Action in Perception, 2006



“During visual search, the brain performs a sophisticated deployment of **eye movements** (saccadic actions) to gather information to subserve perceptual judgments.”

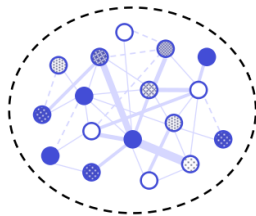
Eckstein et al., J. Neuroscience, 2007



“La **perception** et l'**action**, le perceptif et le moteur sont liés en tant que motifs **émergents** qui se **sélectionnent** mutuellement.” [Varela, 1993]

Système énactif

- Système **dynamique incarné**:
interaction **locale** entre unités **élémentaires homogènes**:
→ système réactif / décision “structurelle”
- Système **dynamique situé**:
interaction **globale** entre flux **hétérogènes**:
→ système actif / décision “modulée”



Problématique:

Comment passer de “l'**émergence réactive**” à “l'**émergence active**”?

- **Objectif 1:** comment des comportements complexes émergent d'un calcul local et homogène ?

- ▶ **Objectif 1:** comment des comportements complexes émergent d'un calcul local et homogène ?
 - ▶ calculatoire: hypothèses sur l'organisation spatiale et temporelle
→ La CNFT

- ▶ **Objectif 1:** comment des comportements complexes émergent d'un calcul local et homogène ?
 - ▶ calculatoire: hypothèses sur l'organisation spatiale et temporelle
→ La CNFT
 - ▶ fonctionnel: sélection structurelle de cibles visuelles
→ Le colliculus supérieur

- ▶ **Objectif 1:** comment des comportements complexes émergent d'un calcul local et homogène ?
 - ▶ calculatoire: hypothèses sur l'organisation spatiale et temporelle
→ La CNFT
 - ▶ fonctionnel: sélection structurelle de cibles visuelles
→ Le colliculus supérieur
- ▶ **Objectif 2:** comment une sélection active (motivée) peut émerger de l'interaction entre plusieurs boucles et flux hétérogènes?
→ Les ganglions de la base

Approches

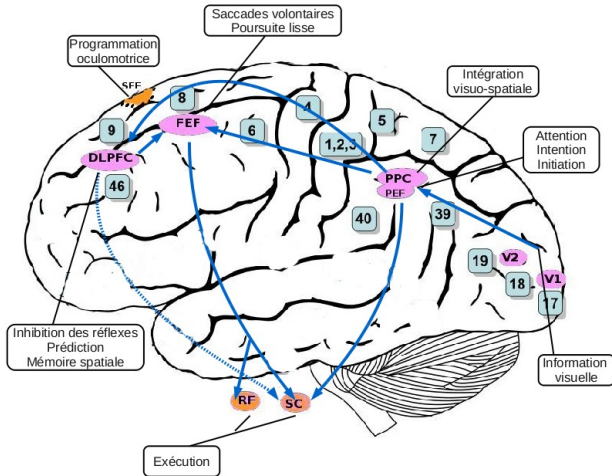
- données biologiques + expériences comportementales
→ hypothèses + paramètres
- modèles + simulations
→ comparaisons + prédictions



Émergence Réactive: Encodage de saccades oculaires

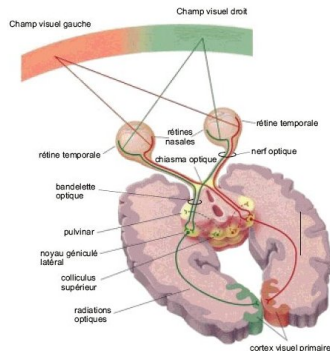
Le système visuo-moteur: sélection de cibles visuelles

► Organisation complexe.



Le colliculus supérieur

- ▶ Petite structure sous-corticale laminaire multimodale
- ▶ Des modèles complexes (typologie, topographie, dynamique)
- ▶ Hypothèses communes:
 - **Projection rétinienne logarithmique** [Optican 1995, Lefèvre 1998, Trappenberg 2001, Nakahara 2006, Marino 2008...]
 - **Carte homogène computationnelle : connectivité latérale** [Droulez et Berthoz 1991, Arai et al 1994, Gancarz et Grossberg 1999, Trappenberg 2001, Schneider and Erhager 2002, Nakahara et al 2006, Marino 2012...]



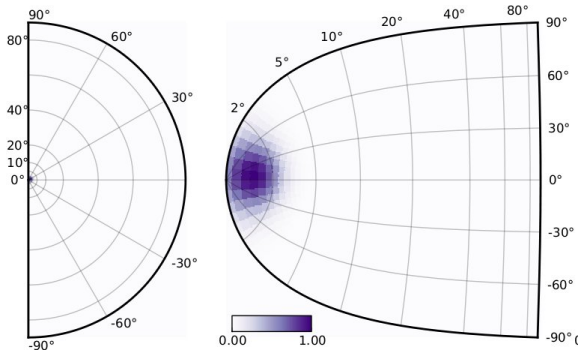
[lecerveau.mcgill.ca]

→ Un modèle “unificateur” :

comportements émergents de ces hypothèses “structurelles” ?

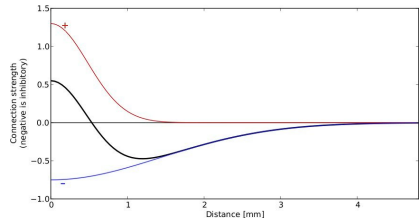
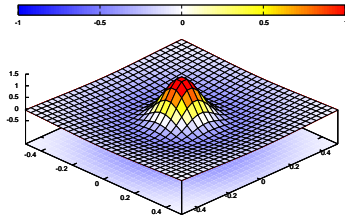
Modèle minimaliste: hypothèses et méthodes

- Codage topographique [Schiller et al 1972, Wurtz et Goldberg 1972]
→ projection logarithmique [Ottes et al 1986]



Modèle minimaliste: hypothèses et méthodes

- Codage par population
→ champ de neurones dynamique: connectivité latérale (CNFT)



Théorie des champs de neurones continus (CNFT)

- ▶ Cortex humain: 10^5 neurones/ mm^3 [C.Koch 2004]
→ une couche de neurones est **un continuum** dans l'espace [Wilson and Cowan 1973].
- ▶ Suivant les notations introduites par [Amari, 1977], l'évolution du **potentiel de membrane** $u(x, t)$ la position x est donnée par:

$$\underbrace{\tau}_{\text{constante de temps}} \cdot \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = \underbrace{-u(x, t)}_{\text{terme de fuite}} + \underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} w(x-y) \cdot f(u(y, t)) dy}_{\text{interaction latérale}} + \underbrace{I(x)}_{\text{entrée}} + \underbrace{h}_{\text{seuil}}$$

Théorie des champs de neurones continus (CNFT)

- ▶ Cortex humain: 10^5 neurones/ mm^3 [C.Koch 2004]
→ une couche de neurones est **un continuum** dans l'espace [Wilson and Cowan 1973].
- ▶ Suivant les notations introduites par [Amari, 1977], l'évolution du **potentiel de membrane** $u(x, t)$ la position x est donnée par:

$$\underbrace{\tau}_{\text{constante de temps}} \cdot \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = \underbrace{-u(x, t)}_{\text{terme de fuite}} + \underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} w(x-y) \cdot f(u(y, t)) dy}_{\text{interaction latérale}} + \underbrace{I(x)}_{\text{entrée}} + \underbrace{h}_{\text{seuil}}$$

- intégration numérique: *du continu au discret*

Théorie des champs de neurones continus (CNFT)

- ▶ Cortex humain: 10^5 neurones/ mm^3 [C.Koch 2004]
→ une couche de neurones est **un continuum** dans l'espace [Wilson and Cowan 1973].
- ▶ Suivant les notations introduites par [Amari, 1977], l'évolution du **potentiel de membrane** $u(x, t)$ la position x est donnée par:

$$\underbrace{\tau}_{\text{constante de temps}} \cdot \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = \underbrace{-u(x, t)}_{\text{terme de fuite}} + \underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} w(x-y) \cdot f(u(y, t)) dy}_{\text{interaction latérale}} + \underbrace{I(x)}_{\text{entrée}} + \underbrace{h}_{\text{seuil}}$$

- intégration numérique: *du continu au discret*
- calcul distribué: *a-t-on besoin d'une horloge centrale?* [Taouali et al 2011]

Théorie des champs de neurones continus (CNFT)

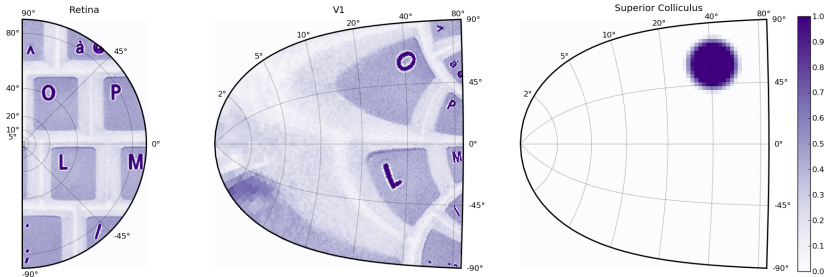
- ▶ Cortex humain: 10^5 neurones/ mm^3 [C.Koch 2004]
→ une couche de neurones est **un continuum** dans l'espace [Wilson and Cowan 1973].
- ▶ Suivant les notations introduites par [Amari, 1977], l'évolution du **potentiel de membrane** $u(x, t)$ la position x est donnée par:

$$\underbrace{\tau}_{\text{constante de temps}} \cdot \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = \underbrace{-u(x, t)}_{\text{terme de fuite}} + \underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} w(x-y) \cdot f(u(y, t)) dy}_{\text{interaction latérale}} + \underbrace{I(x)}_{\text{entrée}} + \underbrace{h}_{\text{seuil}}$$

- intégration numérique: *du continu au discret*
 - calcul distribué: *a-t-on besoin d'une horloge centrale?* [Taouali et al 2011]
- ▶ profils de connexions : **paradigme de compétition** robuste et rapide

Modèle minimaliste: résultats

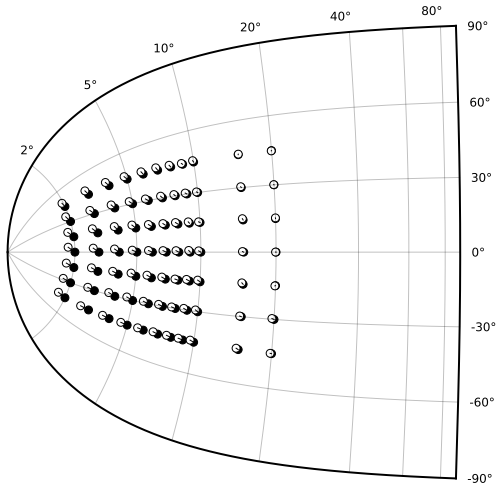
- Sélection d'une sous-population **stéréotypée**: étendue spatiale



- Numérique: activation résultante stable [Amari,1977]
- Biologique: activation stéréotypée [Anderson, 1998]

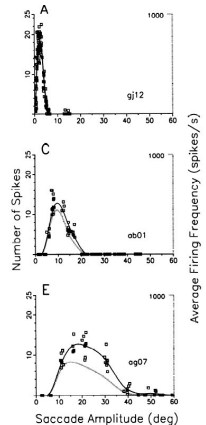
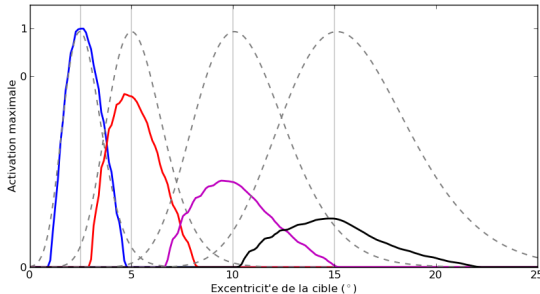
Modèle minimaliste: résultats

► Exactitude du codage par population



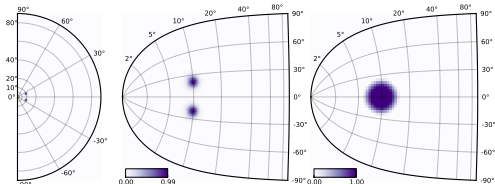
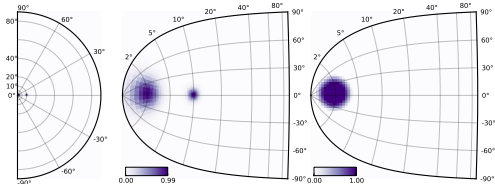
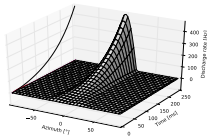
Modèle minimaliste: résultats

- ▶ décroissance du rostral vers le caudal [Munoz and Wurtz 1995].
 - effet de la projection logarithmique et l'inhibition globale
- ▶ un maximum d'activation pour une direction préférentielle

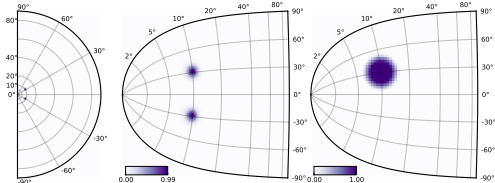
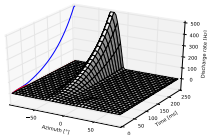


Modèle minimaliste: résultats

- ▶ la projection logarithmique: sélection fovéale [Findlay and Walker 1999]
- ▶ $< 50^\circ$: Effet global [Coren and Hoenig 1972]

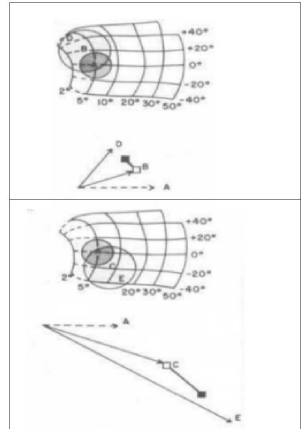
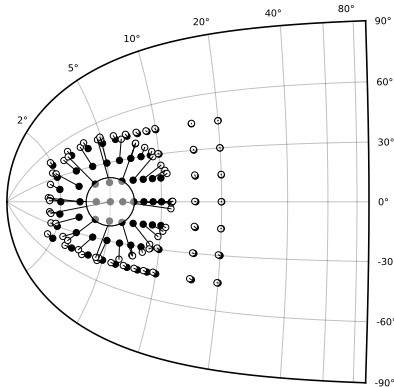


- ▶ $> 50^\circ$: Effet distracteur distant [Levy-schoen 1969]



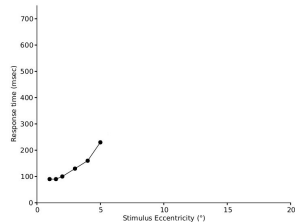
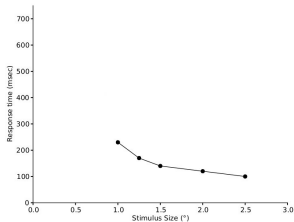
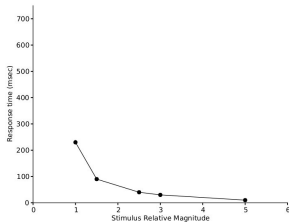
Modèle minimaliste: résultats

- Inactivation locale → saccades
Hypo-métriques et *hyper-métriques*
comme reporté dans [Lee, Rohrer and Sparks 1988].



Modèle minimaliste: prédictions

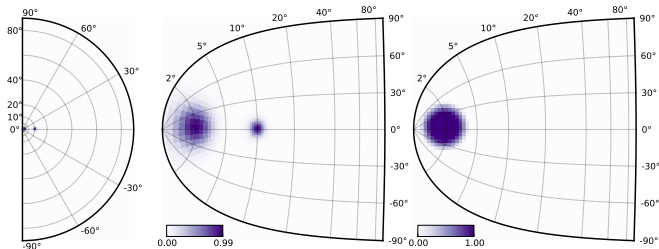
► Temps de réponse (taille, excentricité, intensité)



- ▶ un fonctionnement local et homogène avec connectivité latérale

- ▶ un fonctionnement local et homogène avec connectivité latérale
- ▶ un flux séquentiel avec une topographie particulière: codage spatial

- ▶ un fonctionnement local et homogène avec connectivité latérale
- ▶ un flux séquentiel avec une topographie particulière: codage spatial
- ▶ un modèle de base simple et solide pour l'encodage de cibles visuelles

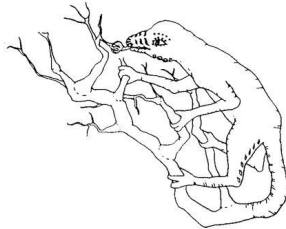


- une sélection structurelle imposée par l'architecture intrinsèque

- une **sélection structurelle** imposée par l'architecture intrinsèque
- un système dynamique **incarné** [Varela]: rétine fovéale

- une **sélection structurelle** imposée par l'architecture intrinsèque
- un système dynamique **incarné** [Varela]: rétine fovéale
- un système dynamique **situé**:

Interaction active avec l'environnement et émergence active?



Émergence Active:
Sélection de l'action

Section 2:





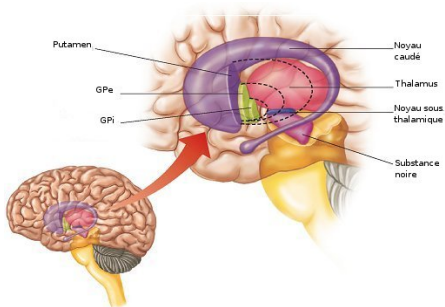
La **saillance**:

- une monnaie commune
 - une valeur d'utilité attribuée ponctuellement
 - contexte sensoriel, émotif et temporel
- les ganglions de la base

Les ganglions de la base (BG)

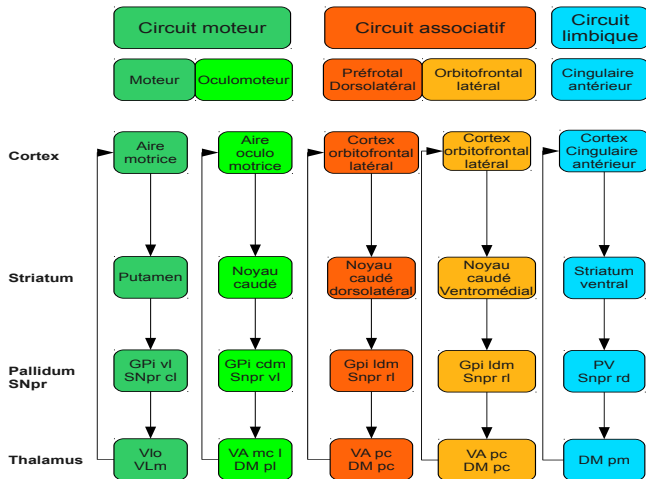
Un ensemble de noyaux sous-corticaux :
entrées **corticales** – sorties **thalamiques**

- ▶ une structure d'entrée: striatum (**Str**:putamen+noyau caudé)
- ▶ deux structures de sorties: pallidum interne (**GPe**) et substance noire réticulée (**SNr**)
- ▶ deux structures intermédiaires: noyau sous-thalamique (**STN**) et pallidum externe (**GPe**)



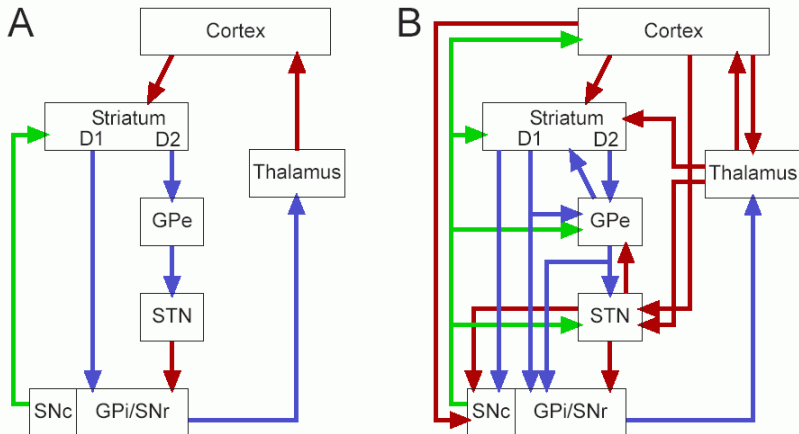
Les BG: Organisation en circuits

- ▶ plusieurs circuits/fonctions
- ▶ rôle générique de sélection de l'action

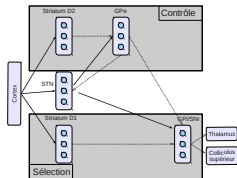


Les BG: Organisation des connexions

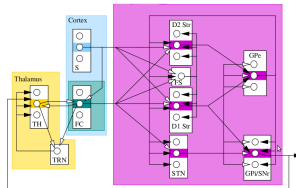
- ▶ voie directe: **inhibitrice** locale
- ▶ voie indirecte: **excitatrice** diffuse
- ▶ voie hyperdirecte: **excitatrice** diffuse
- ▶ voie nigrostriatale : **dopamine**



Modèle GPR [Gurney et al 2001]



Modèle CBG [Girard et al 2008]

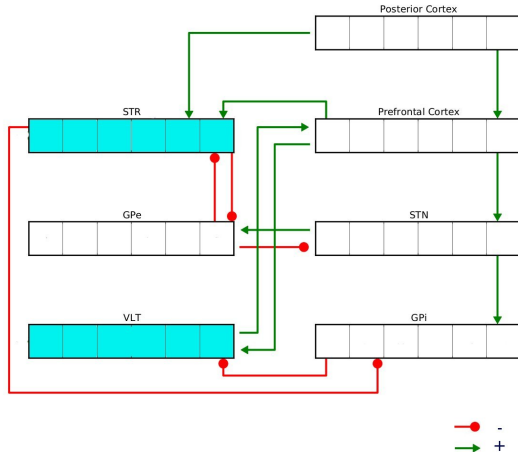


- ▶ structuration en **canaux**
- ▶ sélection par **désinhibition** : GPI inhibe Thalamus toniquement
- ▶ sélection de l'action pour des agents autonomes [Girard 2003, Gonzalez et al 2000, Prescott et al 2006]
- **sélection feedforward: le plus saillant gagne** (sélection passive)

Les BG: sélection active

Hypothèses

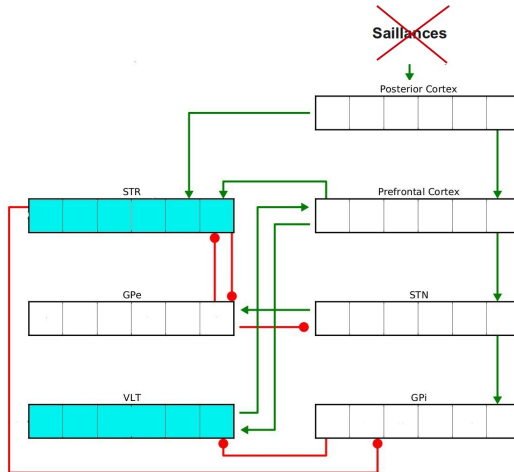
- Architecture de base similaire à GPR et CBG



Les BG: sélection active

Hypothèses

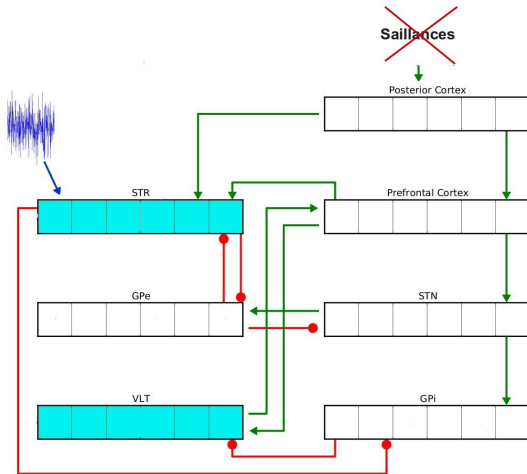
- Pas de vecteur de saillances précalculé



Les BG: sélection active

Hypothèses

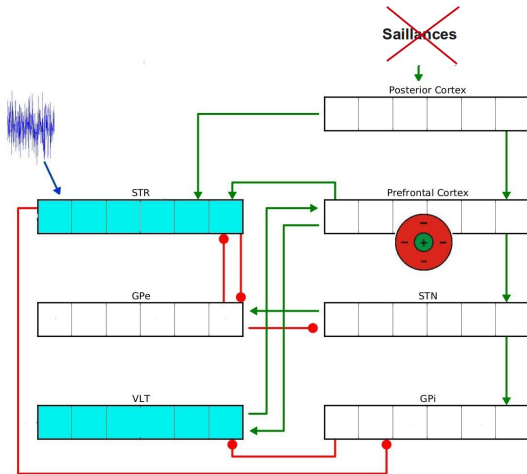
- Bruit striatal



Les BG: sélection active

Hypothèses

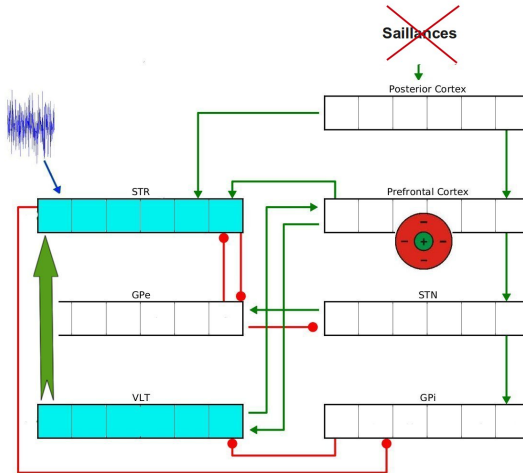
- Inhibition latérale



Les BG: sélection active

Hypothèses

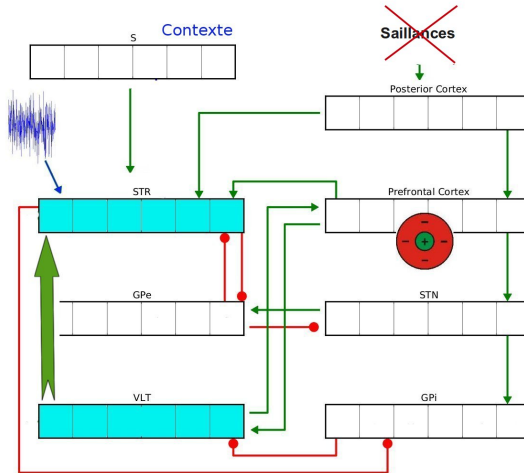
- feedback thalamique



Les BG: sélection active

Hypothèses

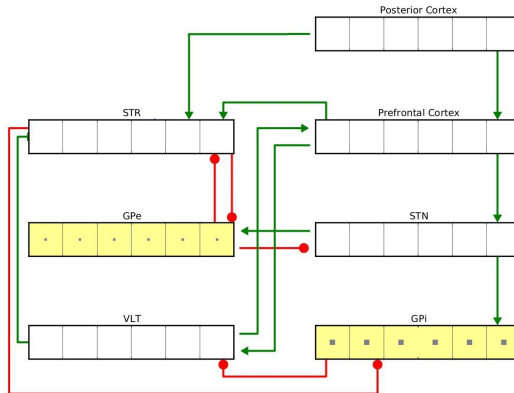
- Une représentation dynamique du contexte



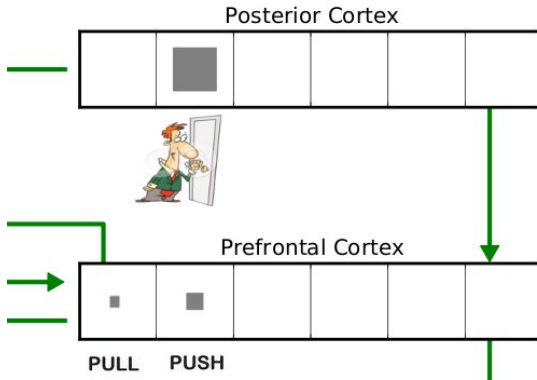
Simulation du modèle

- Exemple sans apprentissage (la structure S n'est pas considérée)

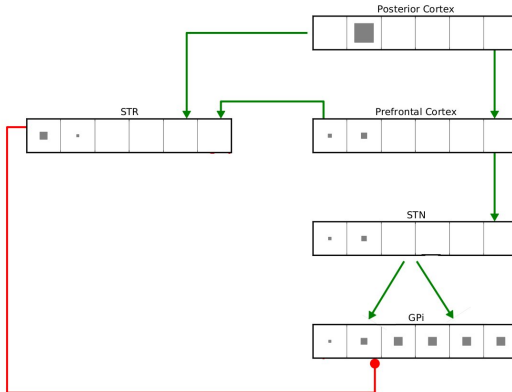
Au repos



Simulation du modèle

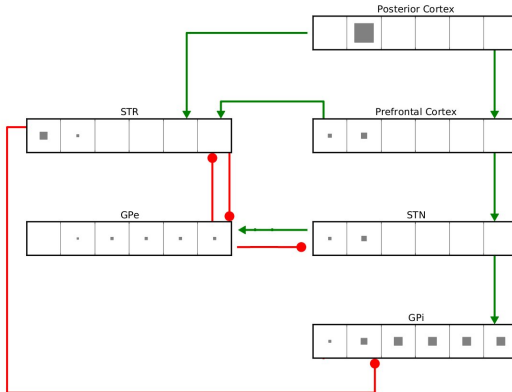


Simulation du modèle



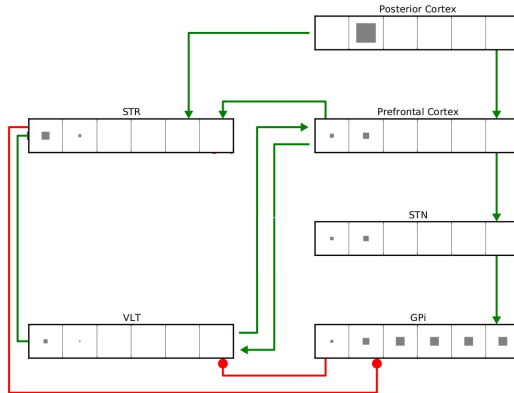
Temps=0.70s

Simulation du modèle



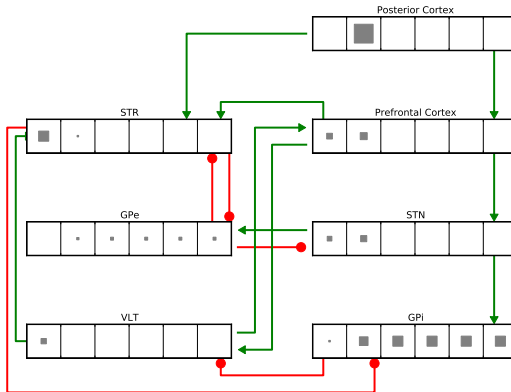
Temps=0.70s

Simulation du modèle



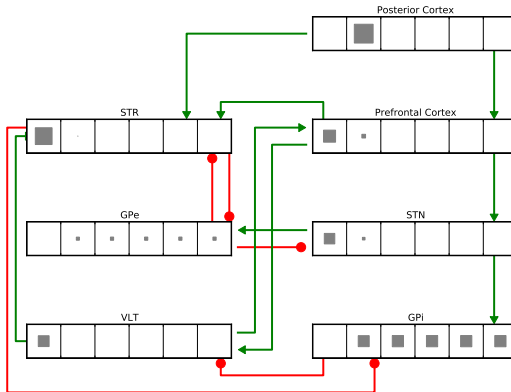
Temps=0.70s

Simulation du modèle



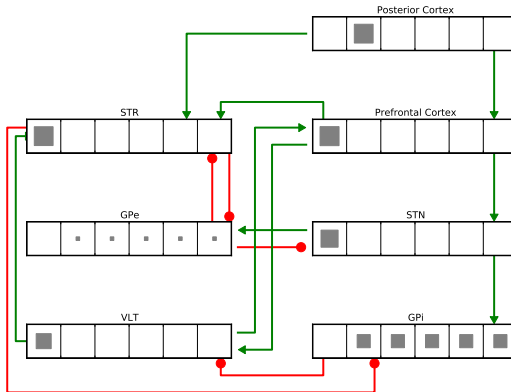
Temps=1.00s

Simulation du modèle



Temps=1.50s

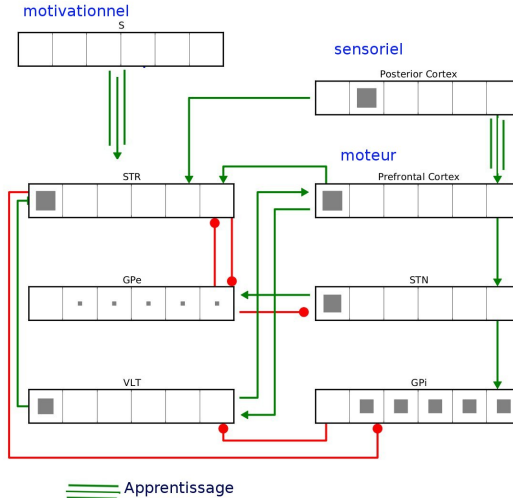
Simulation du modèle



Temps=2.00s

Les BG: sélection

- Une évaluation **dynamique** de la saillance



- Une décision (alternative) émerge de la dynamique du modèle :
 - ▶ **Exploration** explicite: préactivation, bruit striatal
 - ▶ **Sélection**: boucles récurrentes, balance de flux inhibiteurs/excitateurs, activité tonique
 - ▶ **Stabilisation**: inhibition latérale (PFC) et feedback (thalamus)

- Une décision (alternative) émerge de la dynamique du modèle :
 - ▶ **Exploration** explicite: préactivation, bruit striatal
 - ▶ **Sélection**: boucles récurrentes, balance de flux inhibiteurs/excitateurs, activité tonique
 - ▶ **Stabilisation**: inhibition latérale (PFC) et feedback (thalamus)
- Une représentation **dynamique** du contexte **motivationnel**

→ **Émergence active**

- Système dynamique incarné: émergence (décision) structurelle

- Système dynamique incarné: émergence (décision) structurelle
 - ▶ la CNFT: un calcul local, adaptatif et asynchrone
 - Résolution numérique : **discrétisation spatiale et temporelle** (qualité/coût)

- Système dynamique incarné: émergence (décision) structurelle
 - ▶ la CNFT: un calcul local, adaptatif et asynchrone
 - Résolution numérique : **discrétisation spatiale et temporelle** (qualité/coût)
 - ▶ Un codage par population
 - Comportements complexes **émergents** (latence, exactitude, altération)
 - sélection **intrinsèque**

- Système dynamique incarné: émergence (décision) structurelle
 - ▶ la CNFT: un calcul local, adaptatif et asynchrone
 - Résolution numérique : **discrétisation spatiale et temporelle** (qualité/coût)
 - ▶ Un codage par population
 - Comportements complexes **émergents** (latence, exactitude, altération)
 - sélection **intrinsèque**
- Système dynamique situé: émergence (décision) active
 - Interaction entre flux hétérogènes
 - Un mécanisme **d'exploration**
 - Évaluation dynamique de la **saillance**

- Système dynamique incarné: émergence (décision) structurelle
 - ▶ la CNFT: un calcul local, adaptatif et asynchrone
 - Résolution numérique : **discrétisation spatiale et temporelle** (qualité/coût)
 - ▶ Un codage par population
 - Comportements complexes **émergents** (latence, exactitude, altération)
 - sélection **intrinsèque**
- Système dynamique situé: émergence (décision) active
 - Interaction entre flux hétérogènes
 - Un mécanisme **d'exploration**
 - Évaluation dynamique de la **saillance**
- ▶ La relation structure/fonction → systèmes énatifs

- ▶ Exécuter une saccade:
 - modèles de **générateurs moteurs de saccades** (trajectoire stéréotypée [Gisbergen et al 1985,...,Nichols 1998]/trajectoire variable [Erkelens 1995])
- ▶ Passer à la saccade suivante: **exploration** d'une scène visuelle:
 - remapping, mémoire de travail, inhibition, feedback (infotaxis [Vergassola 2007])
- ▶ Choix de la cible: Boucle sous corticale:
 - colliculus supérieur- ganglions de la base- thalamus [Leigh and Zee 2006]
- ▶ Interaction séquentielle entre circuits moteur, cognitif et limbique:
 - **spirale** d'Haber [Haber 2003]

Questions?

Merci pour votre attention!

