

Mise au point du système vibrissal du robot-rat Psikharpax et contribution à la fusion de ses capacités visuelle, auditive et tactile

Thèse soutenue par : Steve N'GUYEN
Dirigée par : Jean-Arcady MEYER

UPMC
UNIVERSITÉ PARIS
SORBONNE UNIVERSITÉS



23/09/10

Objectifs



- Robot-rat bio-inspiré
- Autonome
- Adaptatif

→ capable de « survivre »

Jean-Arcady Meyer : chef de projet

Hardware

Christophe Grand :
conception, coordination mécatronique

Brain Vision Systems
(Patrick Pirim) :
électronique

Mathieu Bernard :
audition

Steve N'Guyen :
tactile, audition, vision, fusion

Software

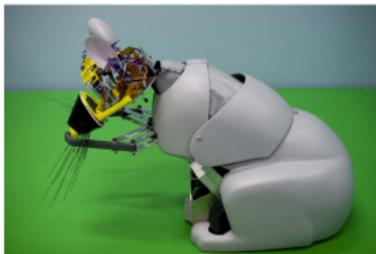
Agnès Guillot :
coordination architectures biomimétiques

Benoît Girard :
sélection de l'action

Mehdi Khamassi :
apprentissage par
renforcement

Louis-Emmanuel Martinet :
planification

Laurent Dollé :
sélection de stratégies



Contexte de cette thèse : perception

- Modalités sensorielles
- Intégration multimodale
- Boucle sensori-motrice (orientation)

- 1 Système vibrissal
- 2 Système auditif
- 3 Système visuo-moteur
- 4 Intégration multimodale
- 5 Discussion

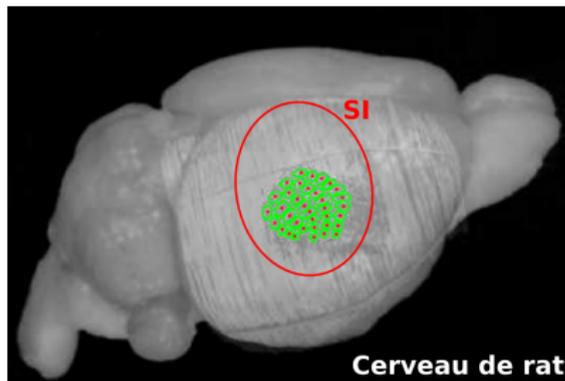
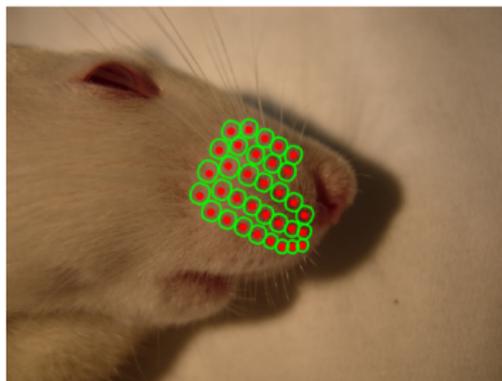
Intérêts scientifiques

Vibrisses du rat : "couteau suisse"



- Reconnaissance de textures (Carvell and Simons, 1990), (Guic-Robles et al., 1989)
- Navigation (suivi de mur, taille des ouvertures...)

Intérêts scientifiques



Biologie

- Modalité sensorielle importante
- Organisation somatotopique (cortex à tonneaux)
- Encodage de l'information dans le cerveau

Intérêts scientifiques

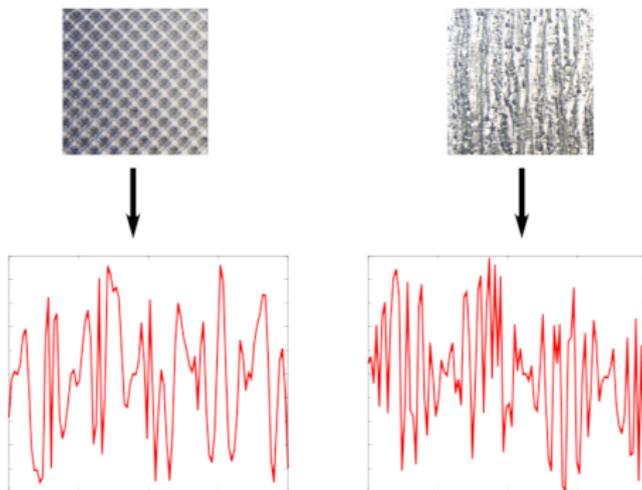


Robotique

- Capteur tactile très riche
- Transduction par déformation mécanique
- Robustesse

Problématique des textures : 2 théories

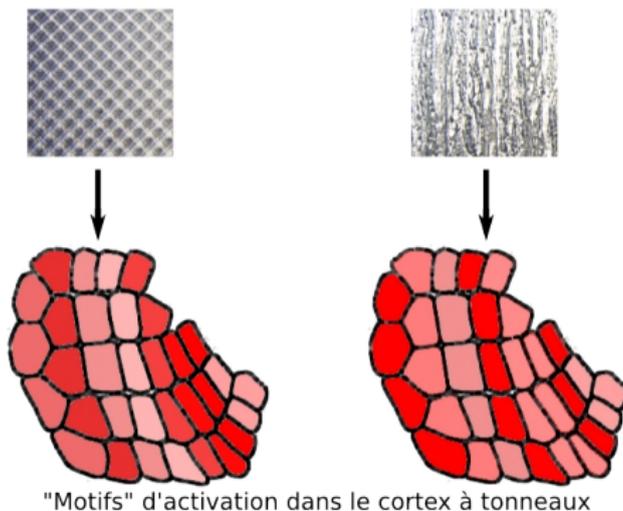
- « Signature dynamique » (Arabzadeh et al., 2004)
→ encodage « temporel »



Chaque vibrisse encode la structure temporelle de la vibration

Problématique des textures : 2 théories

- « Résonance » (Moore and Andermann, 2005; Neimark et al., 2003)
→ encodage « spatial »

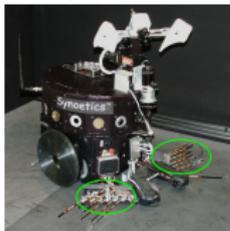


Objectifs

- Reconnaissance de textures
- Extraction de caractéristiques bio-inspirées
- Morphologie
- Efficace sur un robot

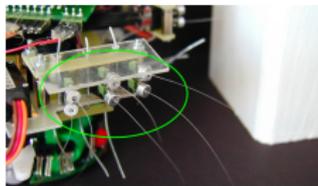
État de l'art

Projet Darwin



(Seth et al., 2004)

Projet AMouse



(Fend, 2005)

Projet Whiskerbot



(Pearson et al., 2007)
 (Fox et al., 2009)

Vibrisses	2 × 7 passives	2 × 6 actives	2 × 3 actives
Traitement	Signal brut	FFT	FFT et bio-inspiré
Capacités	« Motifs »	textures	textures

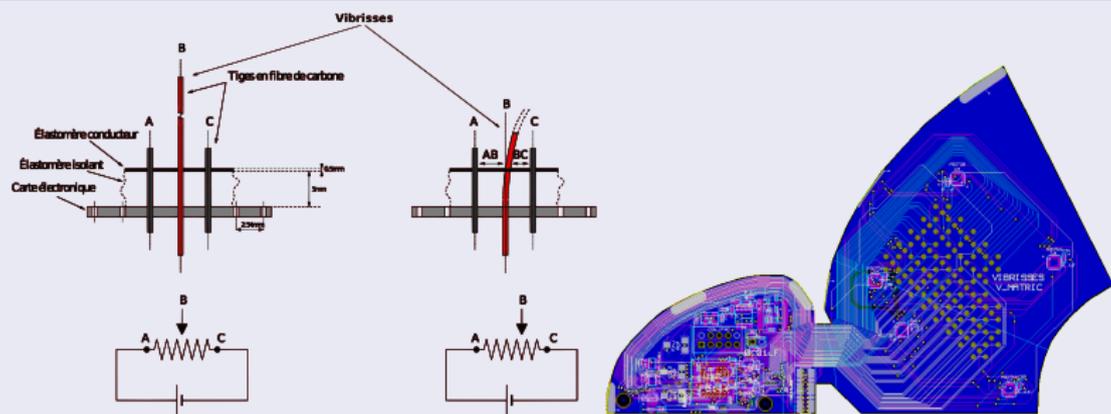
Description du système



- 2×33 vibrisses passives (capteur élastomère)
- Morphologie du rat (lignes, colonnes/arcs)

Description du système (N'Guyen et al., 2009)

Capteur élastomère

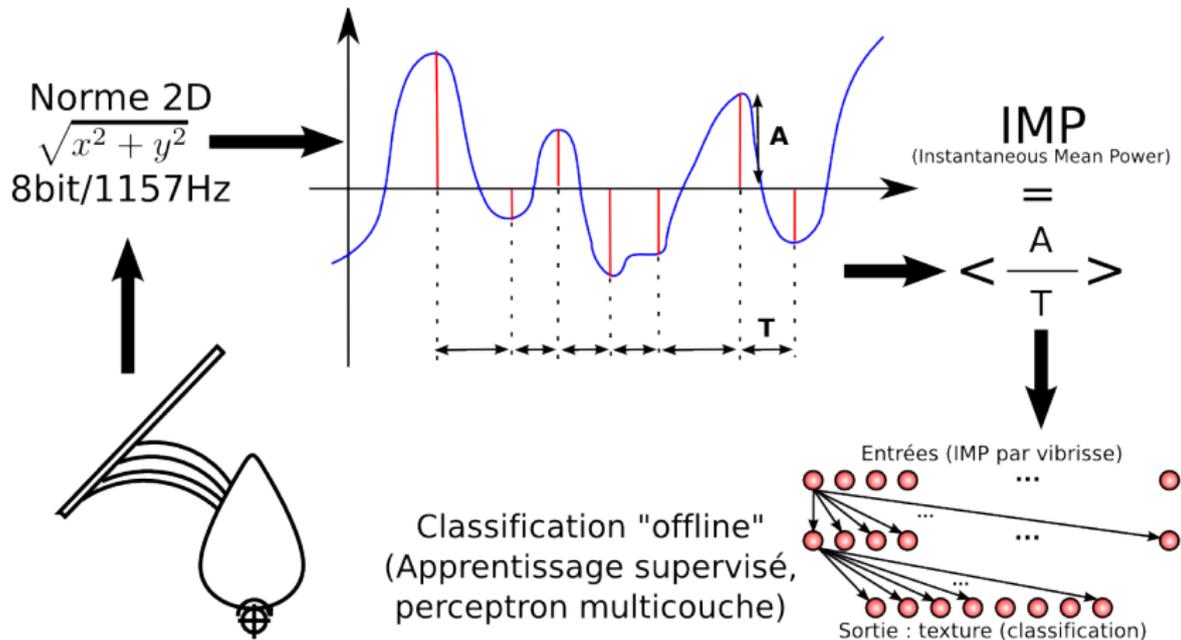


Description du système



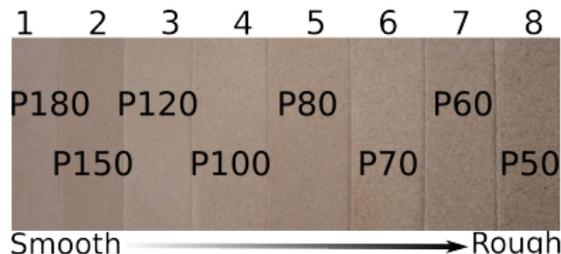
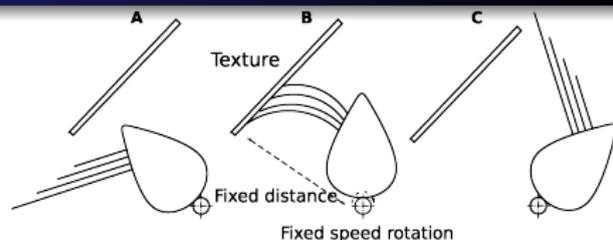
- Gradient de taille

Flux de traitement



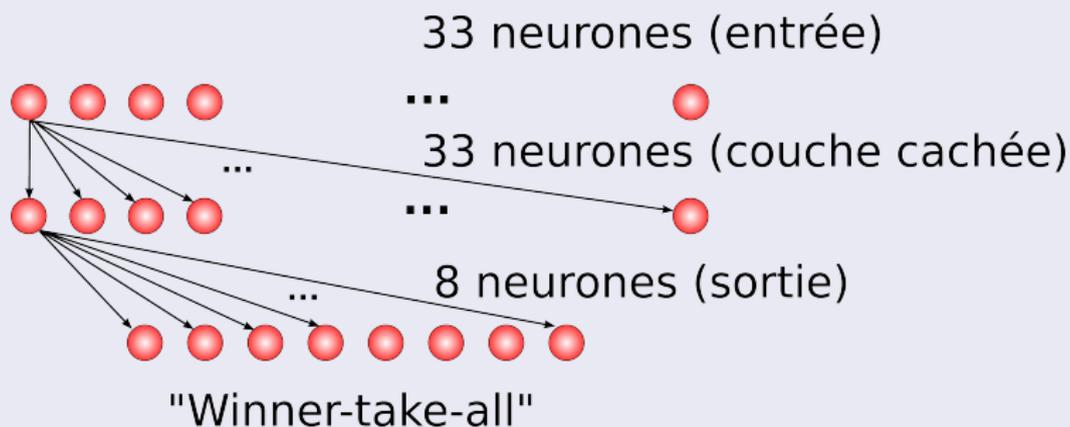
Protocole expérimental (N'Guyen et al., 2010a)

- Toutes les vibrisses « balaiant » la texture
- Environnement contraint (faible variabilité)
- 8 papiers de verre : une tâche difficile (Hipp et al., 2006)



Méthodologie

Analyse des données



- Moyenne de l'IMP pendant un « balayage » (~2-3s)
- 400 mesures pour chaque texture (300+100)

Résultats : reconnaissance de textures

Matrice de classification

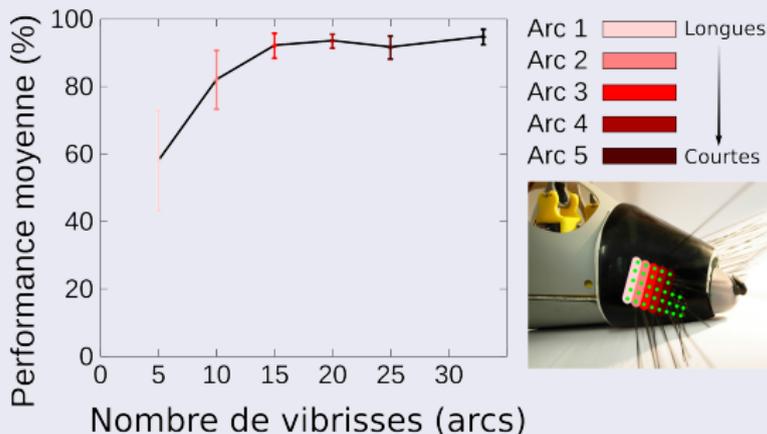
présentée \ reconnue	1	2	3	4	5	6	7	8
1	100	0	0	0	0	0	0	0
2	0	99	1	0	0	0	0	0
3	0	2	95	0	3	0	0	0
4	0	0	0	96	4	0	0	0
5	0	0	1	0	99	0	0	0
6	0	0	0	0	1	93	6	0
7	2	0	6	0	3	9	80	0
8	2	0	0	0	0	1	0	97

Kim (2004) : 85% sur 7 textures (environnement plus contraint)

Fend (2005) : 70% sur 4 textures

Résultats : influence du nombre de vibrisses

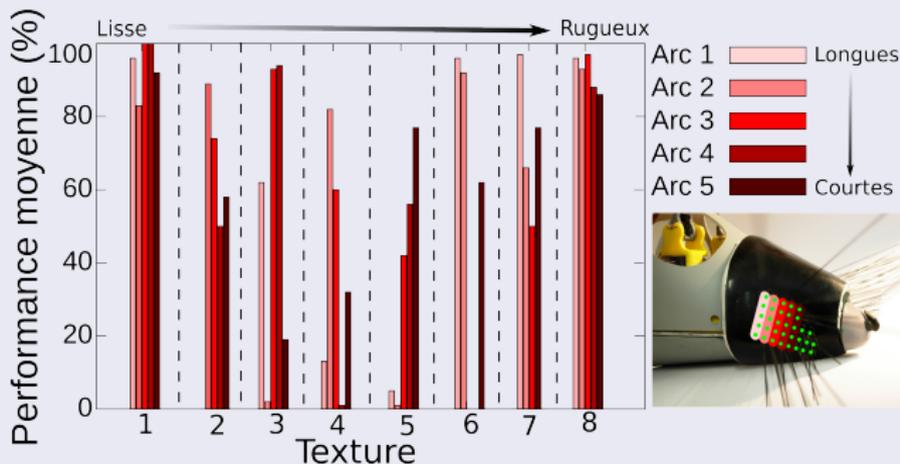
Performance moyenne sur nombre de vibrisses



- Performances augmentent rapidement vers 90%
- Résultats en accord avec les travaux précédents (Fend et al. 2003 : 6 vibrisses, Hipp et al. 2006 : 4 vibrisses)

Résultats : influence de la taille des vibrisses

Performances moyennes pour chaque arc de vibrisses



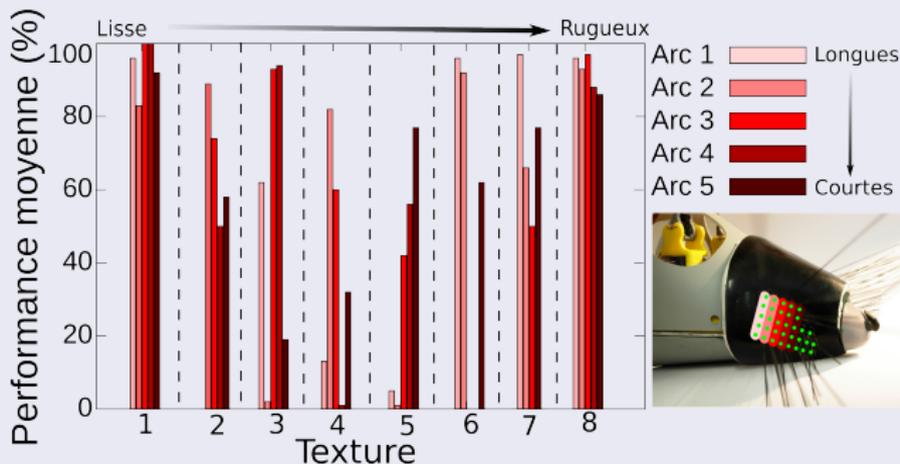
Exemple :

Arc 1 très bon pour texture 1 mais très mauvais pour texture 2

Arc 2 très bon pour texture 2 mais très mauvais pour texture 3

Résultats : influence de la taille des vibrisses

Performances moyennes pour chaque arc de vibrisses



Grande variabilité :

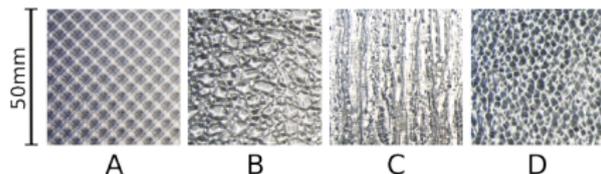
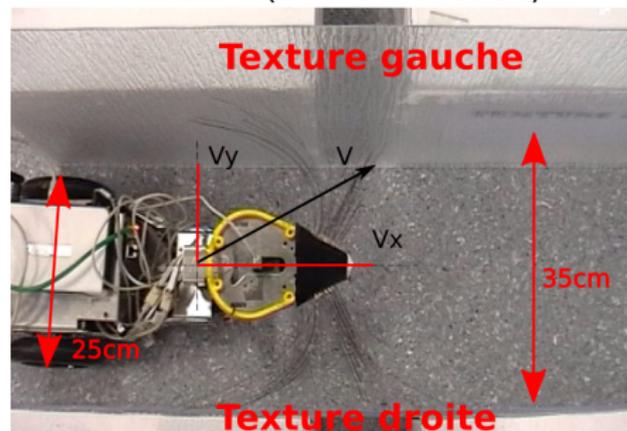
→ Suggère que la taille des vibrisses joue un rôle

→ Complémentarité des arcs ?

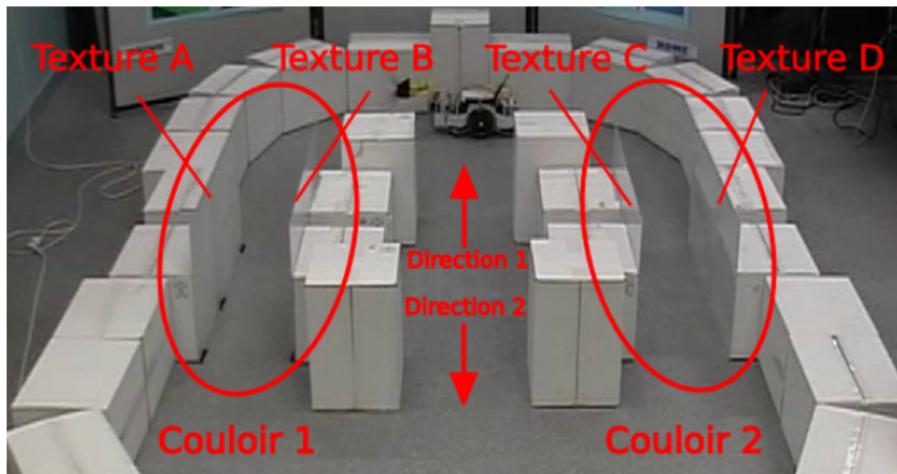
Dispositif expérimental

- Robot mobile dans un couloir texturé (stratégie de « centrage »)
- Mouvements non contraints (variabilité dans le contact)
- Nombre de vibrisses impliquées limité (~ 10)
- 4 textures en plexiglass :

Couloir (vue de dessus)



Dispositif expérimental

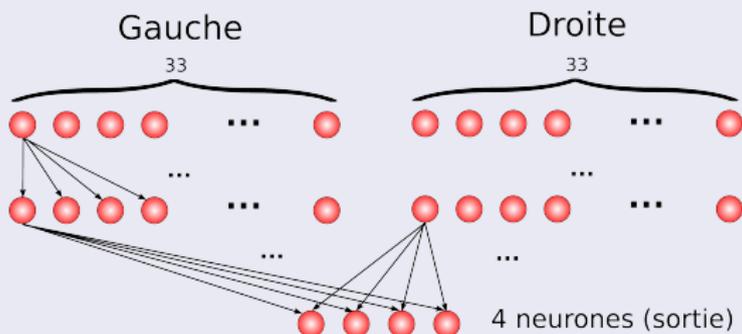


- Couloir 1 : Texture A et Texture B
- Couloir 2 : Texture C et Texture D
- 2 directions

⇒ 4 possibilités

Méthodologie

Analyse des données



- Apprentissage de IMP à chaque pas de temps (~ 7000 par expérience)
- 30 expériences pour chaque couloir et dans chaque direction (10+20)

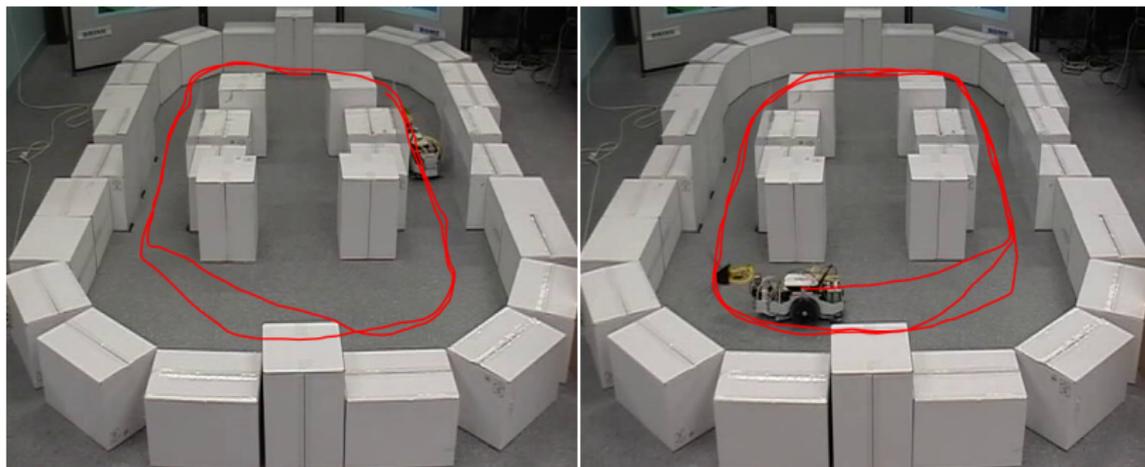
Résultats

Matrice de classification

Actual Case \ Recognized	Corridor 1 Corridor 2	Corridor 1 Corridor 2	Corridor 1 Corridor 2	Corridor 1 Corridor 2
Corridor 1 Corridor 2	 75	 15	 10	 0
Corridor 1 Corridor 2	0	100	0	0
Corridor 1 Corridor 2	15	0	85	0
Corridor 1 Corridor 2	0	15	0	85

Test comportemental

- suivi de mur + stratégie de centrage
- détection de couloir
- comportement « appris » (tourner en sortie de couloir)

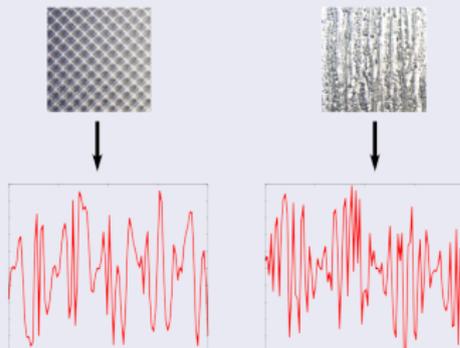


→ Plusieurs tours sans erreur

Discussion

Contributions

- Très bonnes performances en reconnaissance de textures
→ Caractéristique IMP suffisante



Chaque vibrisse encode la structure temporelle de la vibration

Discussion

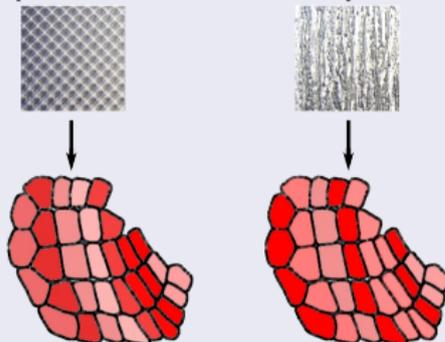
Contributions

- Influence du nombre de vibrisses utilisées.
→ valide d'autres travaux (Fend et al., 2003; Hipp et al., 2006)

Discussion

Contributions

- Influence du nombre de vibrisses utilisées.
→ valide d'autres travaux (Fend et al., 2003; Hipp et al., 2006)
- Influence de la taille des vibrisses
→ Filtrage complexe ? Nécessite plus d'investigations.

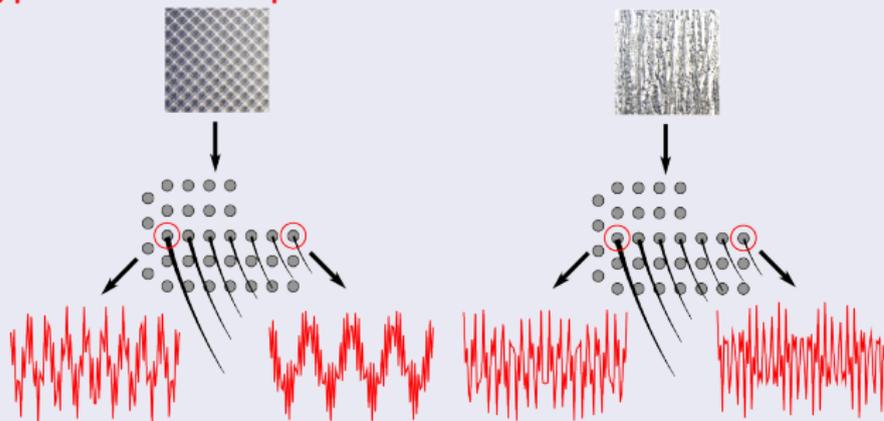


"Motifs" d'activation dans le cortex à tonneaux

Discussion

Contributions

- Hypothèses « signature dynamique » et « résonance »
→ **Hypothèses complémentaires**



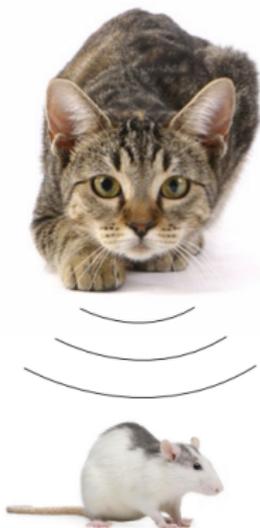
Discussion

Limites

- Vibrisses passives
- Reconnaissance de formes

Intérêt scientifiques

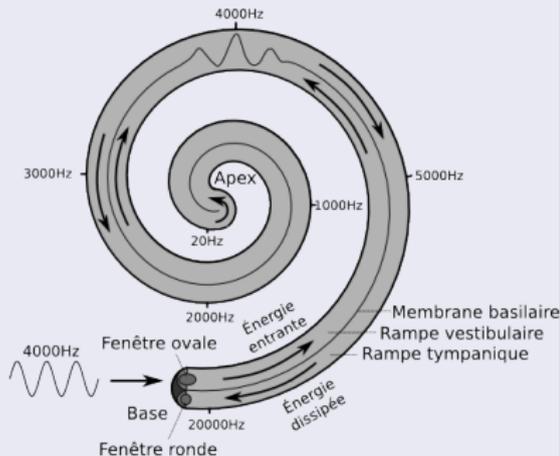
Audition



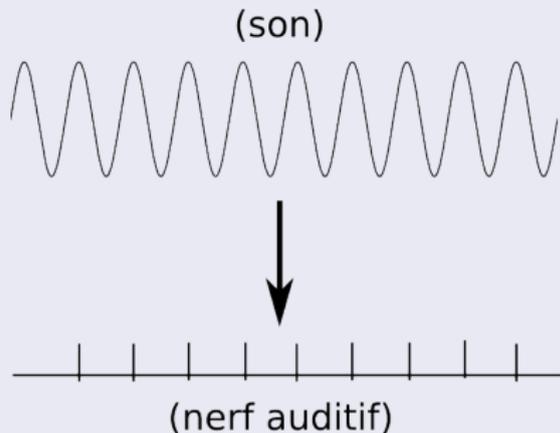
- Modalité à longue portée
- Très sensible
- Relativement robuste aux occlusions
- Structure commune audition/tactile pour la perception des fréquences (Yau et al., 2009; Foxe, 2009)

Contexte scientifique : encodage de l'information

Encodage « spatial »



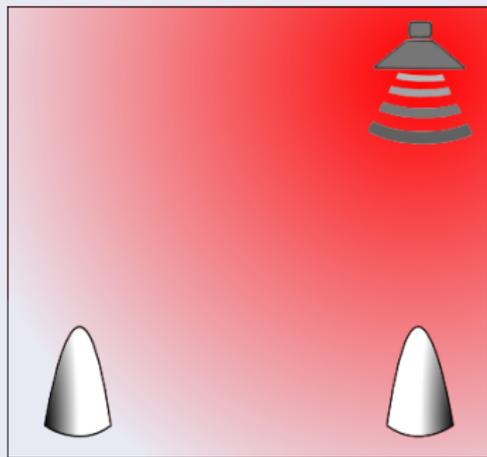
Encodage « temporel »



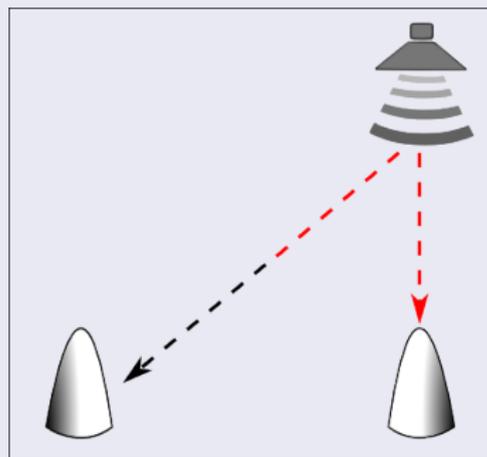
→ parallèle avec les vibrisses ?

Contexte scientifique : localisation en azimut

ILD : différence inter-aurale
d'intensité



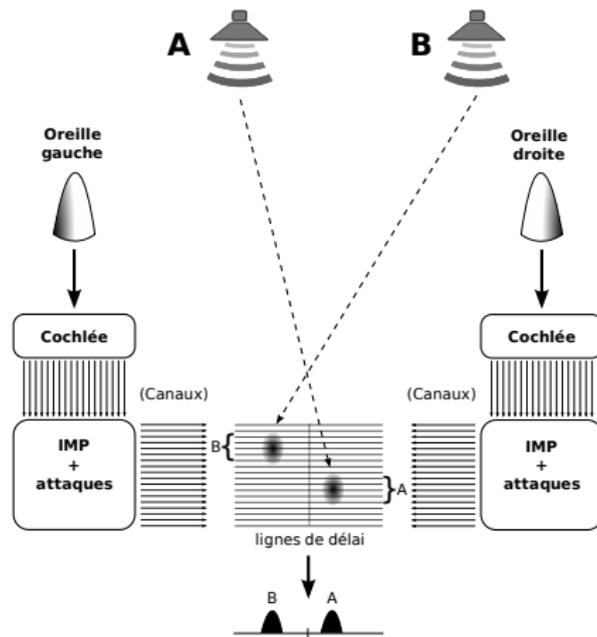
ITD : différence inter-aurale
de temps



Objectifs

- Localisation
- Séparation de sources
- Reconnaissance de sons (lien avec les vibrisses)
- Fonctionnel en environnement bruité

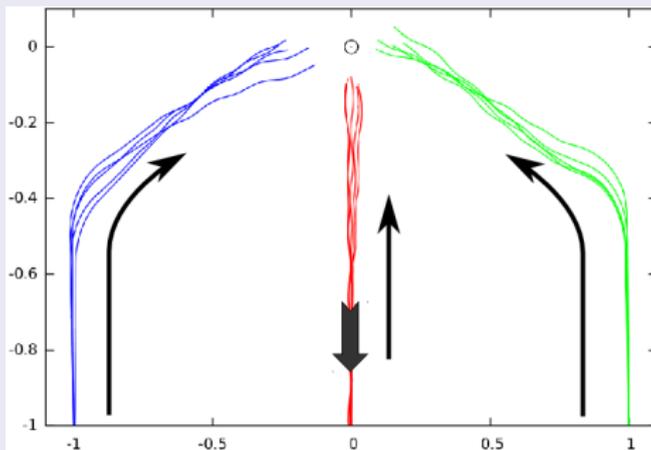
Modèle



Stage de Mathieu Bernard co-encadré et poursuivi en thèse.

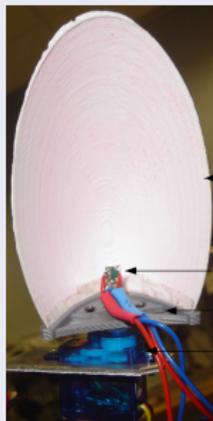
Expérience : phonotaxie (Bernard, N'Guyen et al., 2010a)

Sans pavillon

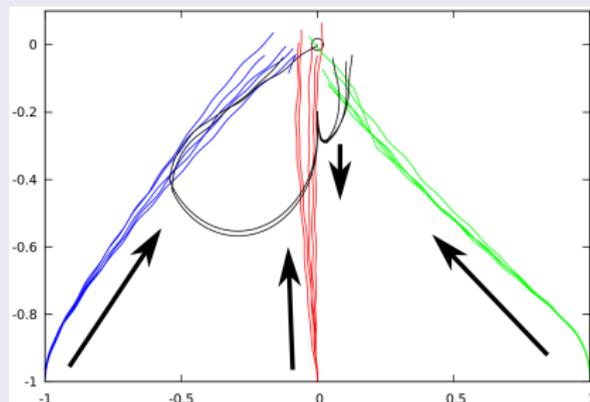


Expérience : phonotaxie (Bernard, N'Guyen et al., 2010a)

Avec pavillons

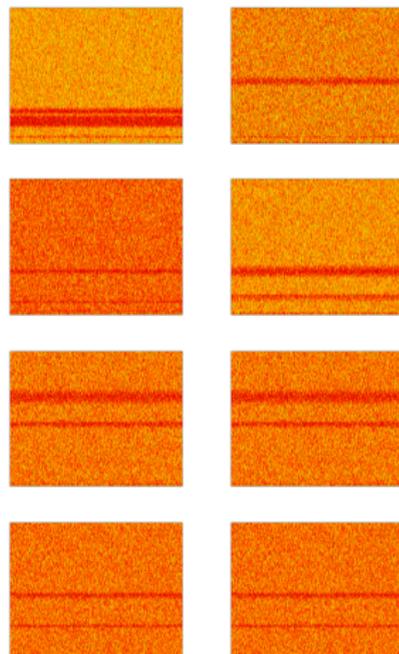
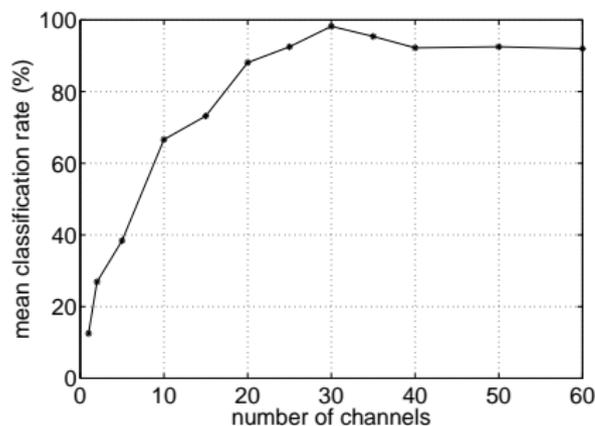


Pavillon
Microphone
(orienté vers le pavillon)
Support
Servomoteur



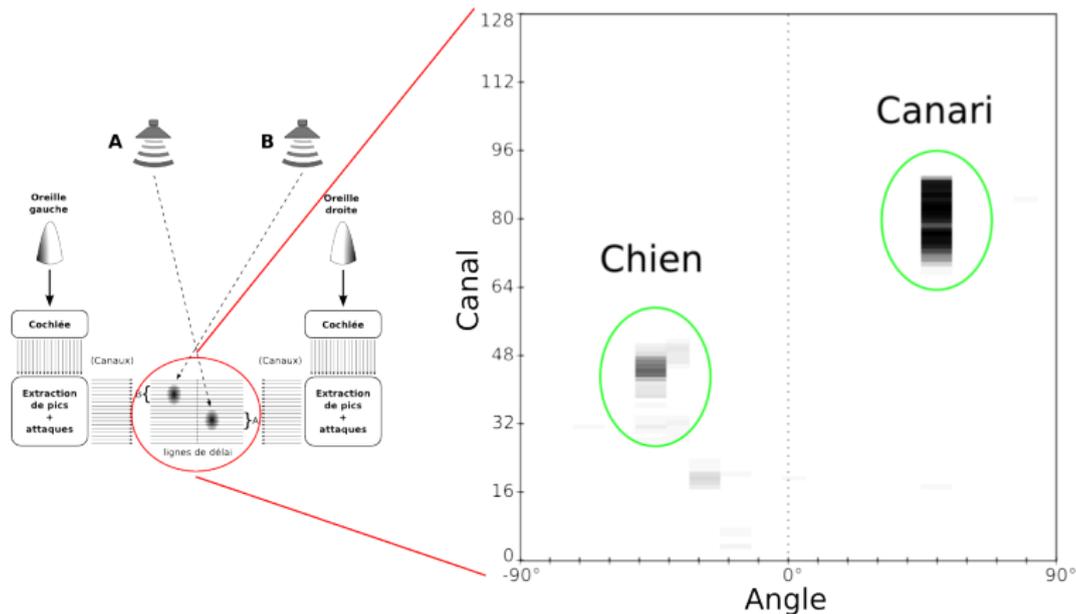
→ intérêt des pavillons

Expérience : reconnaissance de « textures sonores »



8 « textures » simulées (Bernard,
N'Guyen et al., 2010b)

Expérience : séparation de sources



2 sources réelles (disjointes) sur plateforme robotique

Discussion

Contributions

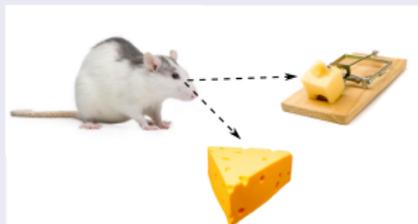
- Localisation (ILD+ITD)
- Séparation de sources
- Reconnaissance de « textures sonores » avec IMP
→ lien audition/vibrisses

Limites

- Élévation
- Séparation de sources fréquentiellement proches

Intérêts scientifiques

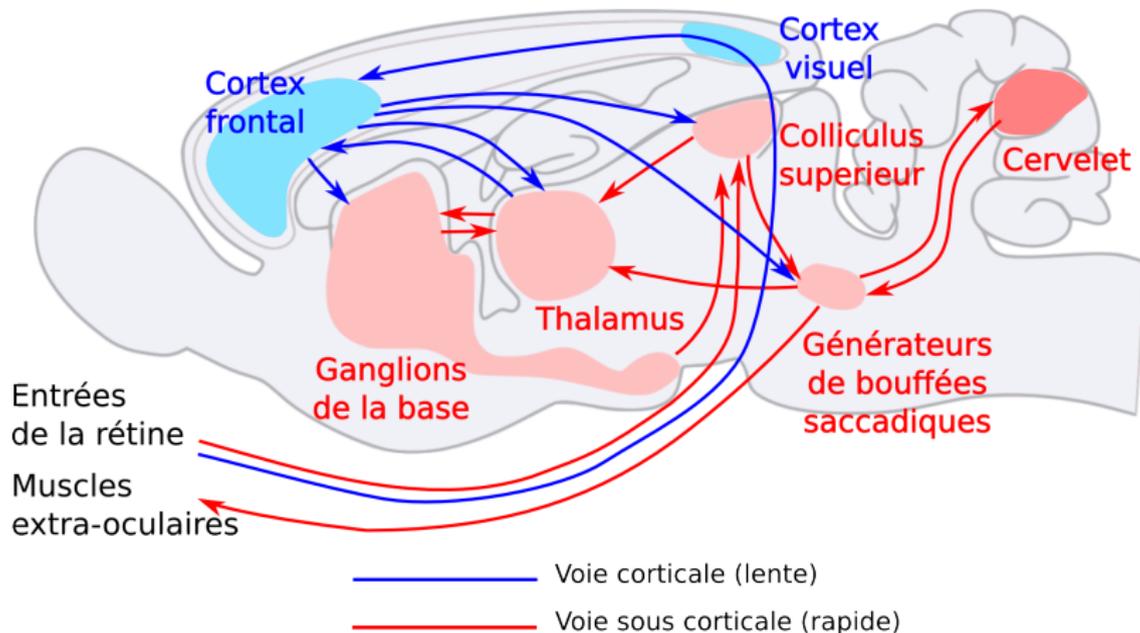
Saccades visuelles



- Mouvements rapides vers des objets « saillants »
- Mouvements d'orientation en général (Schiller, 1972; Felsen and Mainen, 2008)
- Impliquent également sélection de la cible

Contexte scientifique : anatomie

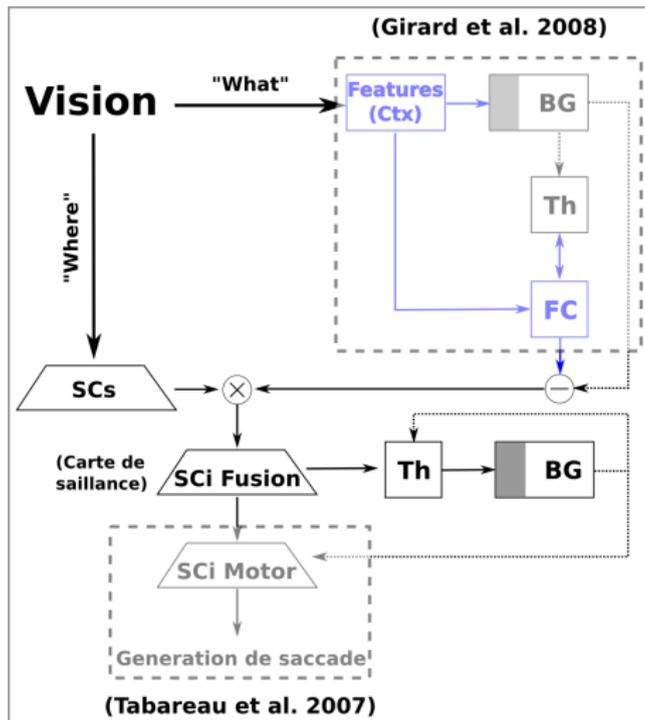
Cerveau de rat



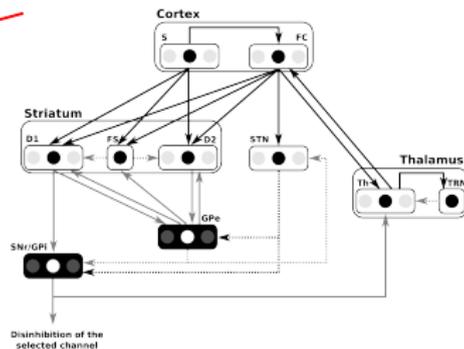
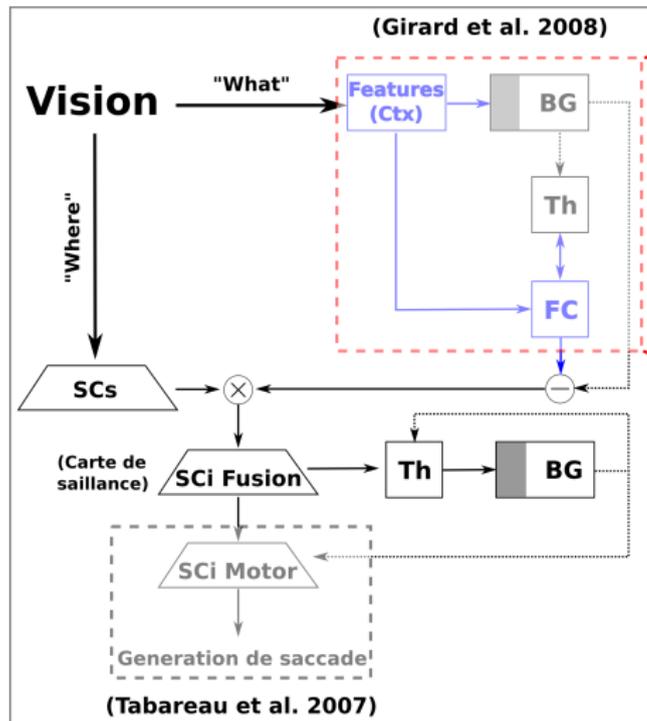
Objectifs

- Proposer un nouveau modèle de génération de saccade
- Produire des comportement basiques
- Explorer les effets de l'apprentissage dans les BG
- Contribuer aux neurosciences
- Tester ce modèle sur un robot

Description du modèle (N'Guyen et al., 2010b)

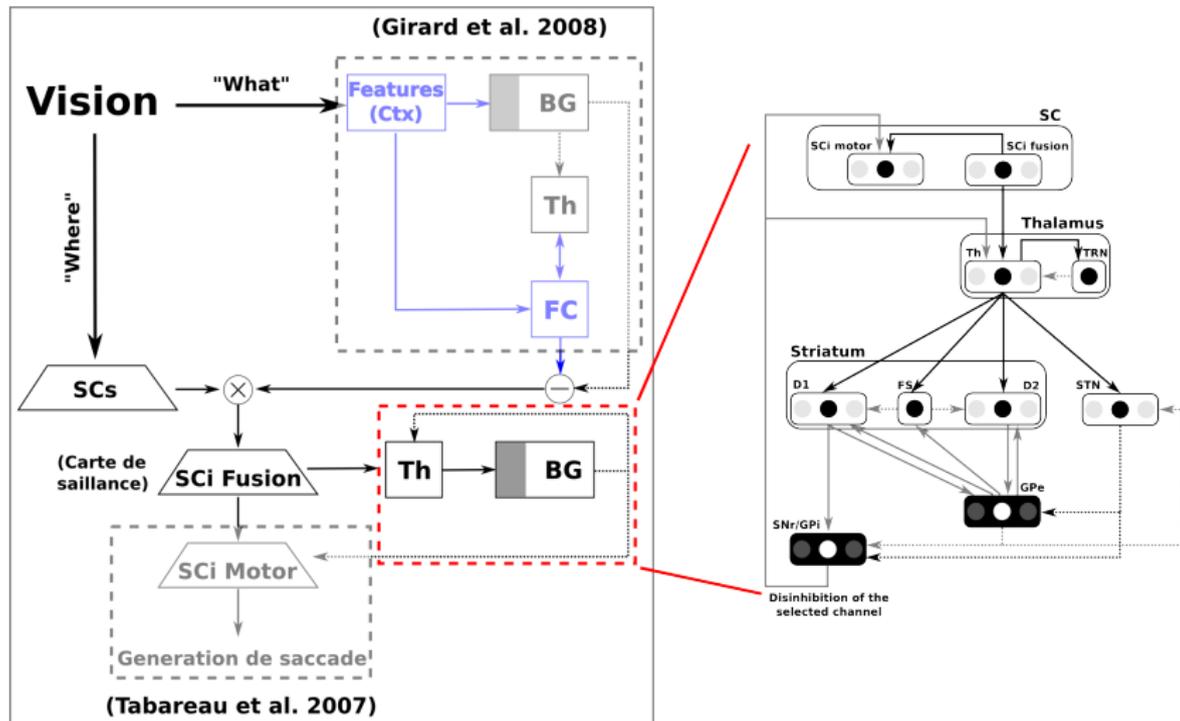


Description du modèle (N'Guyen et al., 2010b)

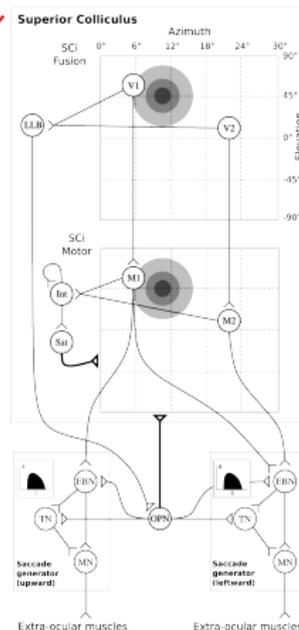
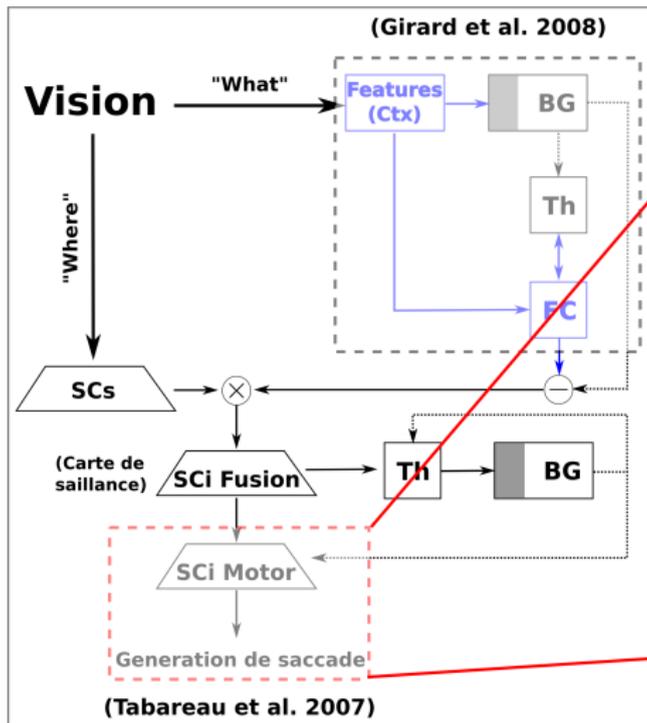


Adapté de Girard et al. 2008

Description du modèle (N'Guyen et al., 2010b)

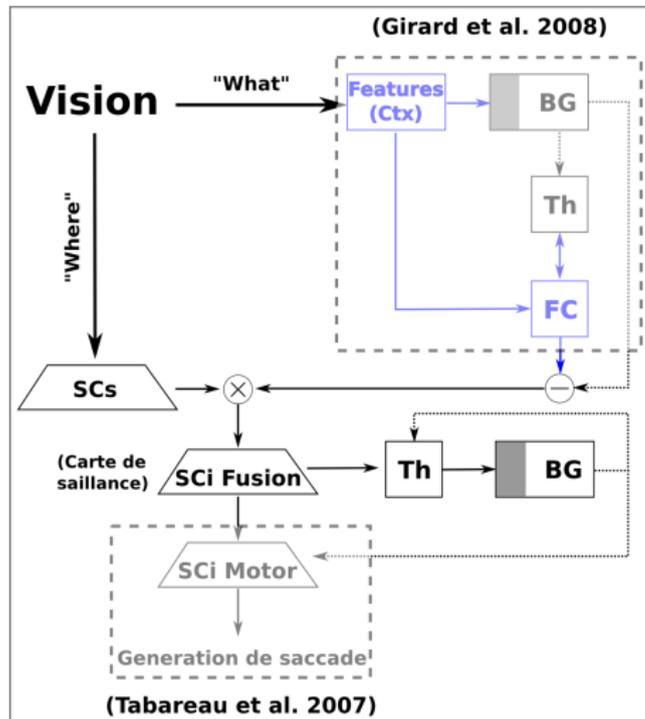


Description du modèle (N'Guyen et al., 2010b)



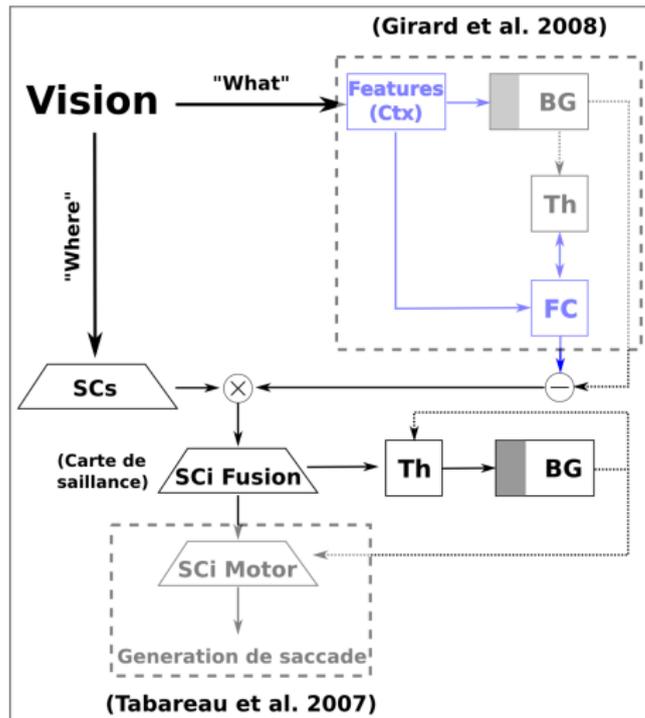
Adapté de Tabareau et al. 2008

Description du modèle (N'Guyen et al., 2010b)



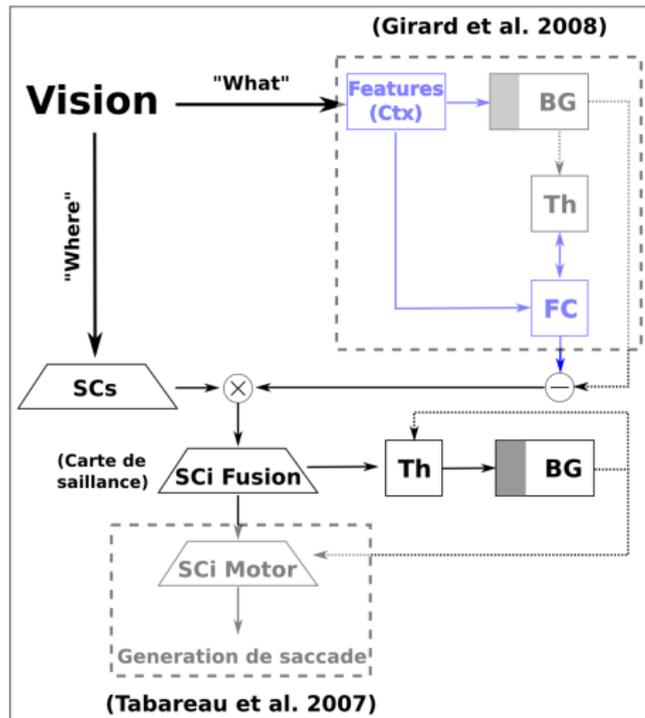
- Boucles sous-corticales et corticales (sélection spatiale et non-spatiale)
→ pas de boucle sous-corticale dans (Dominey and Arbib, 1992)
→ boucle sous-corticale dépendante du cortex dans (Brown et al., 2004)
→ (Chambers et al., 2005) ne traite que les informations spatiales

Description du modèle (N'Guyen et al., 2010b)



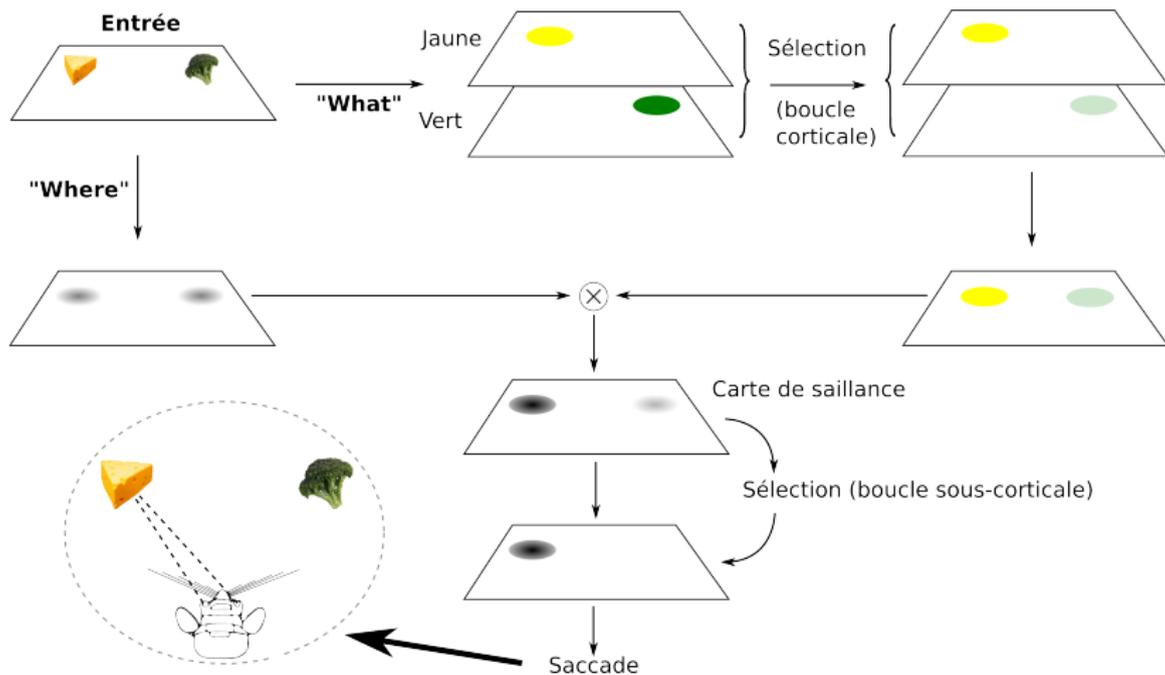
- 2 modules thalamiques indépendants (conforme à la neuro-anatomie) → (Chambers et al., 2005) n'utilise qu'un unique module

Description du modèle (N'Guyen et al., 2010b)

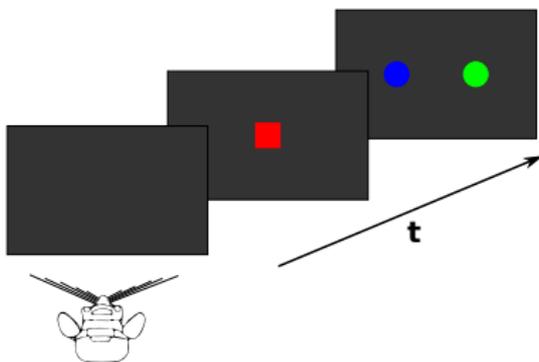


- Modèle de BG récent permettant la sélection (Girard et al., 2008) → (Dominey and Arbib, 1992) nécessite WTA

Exemple



Protocole expérimental



Validation du modèle : apprentissage à 1 cible

Expériences (Hikosaka et al., 1989)

- tâche de saccade
- tâche de fixation
- tâche de chevauchement

Protocole d'apprentissage

- Bonne saccade = récompense positive
- Mauvaise saccade = punition

Apprentissage à 2 cibles (N'Guyen et al., 2010b)

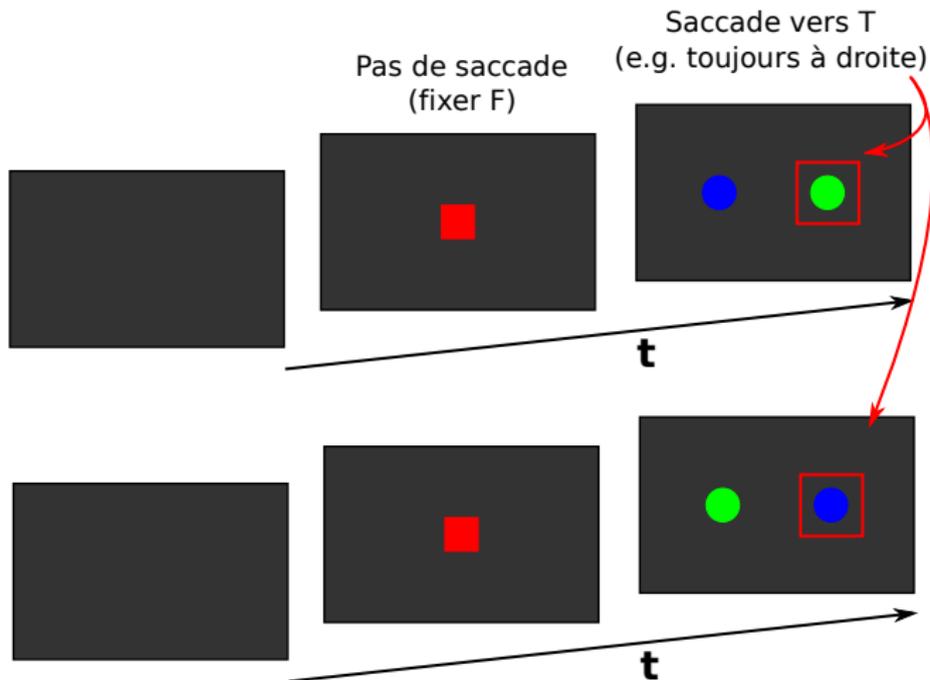
Expériences : implique prise de décision

- Récompense spatiale (boucle sous-corticale)
- Récompense non-spatiale (boucle corticale)
- Combinaison

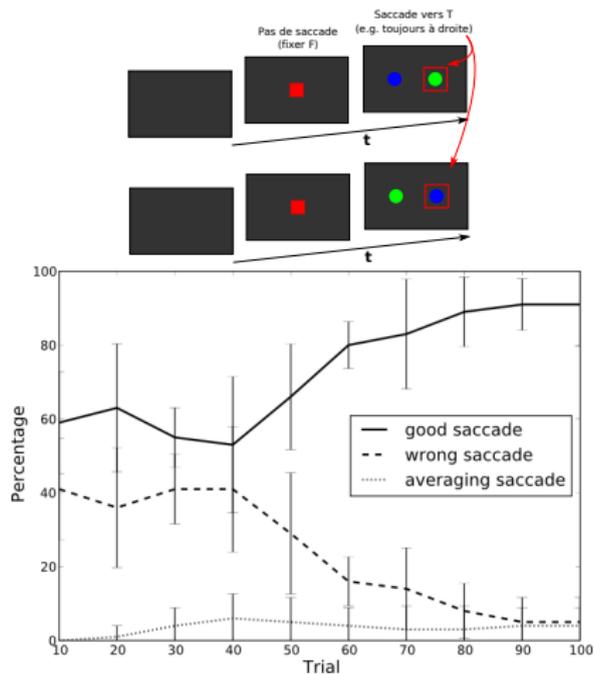
Protocole d'apprentissage

- Bonne saccade = récompense positive
- Mauvaise saccade = punition
- Pas de saccade ou saccade moyenne = pas de récompense

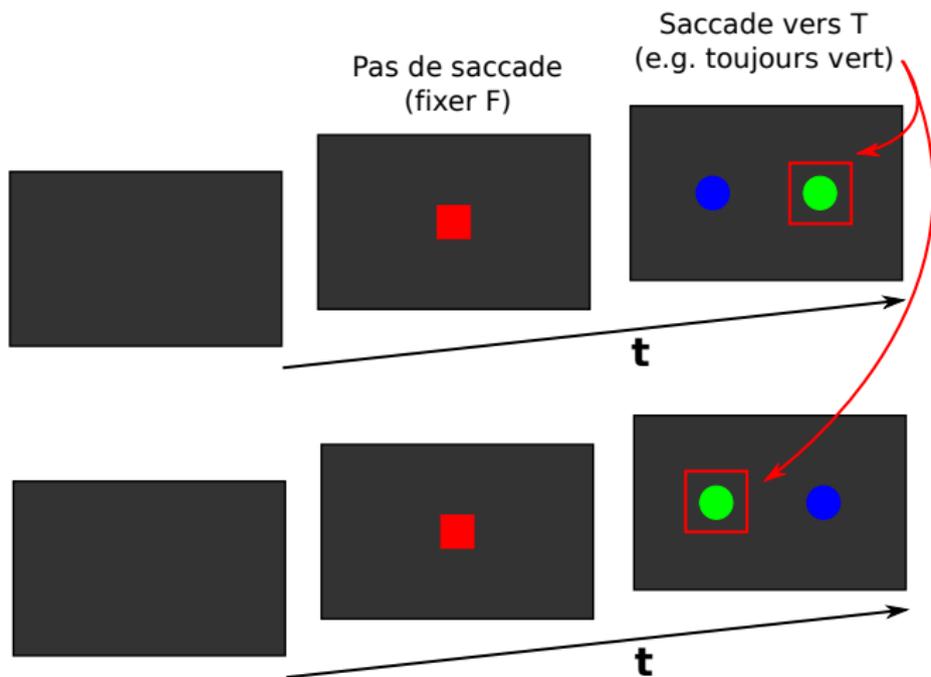
Récompense spatiale



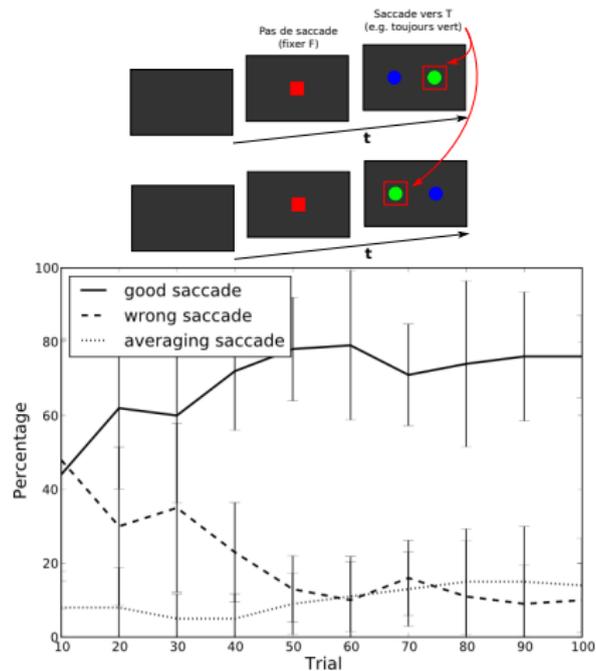
Récompense spatiale : résultats



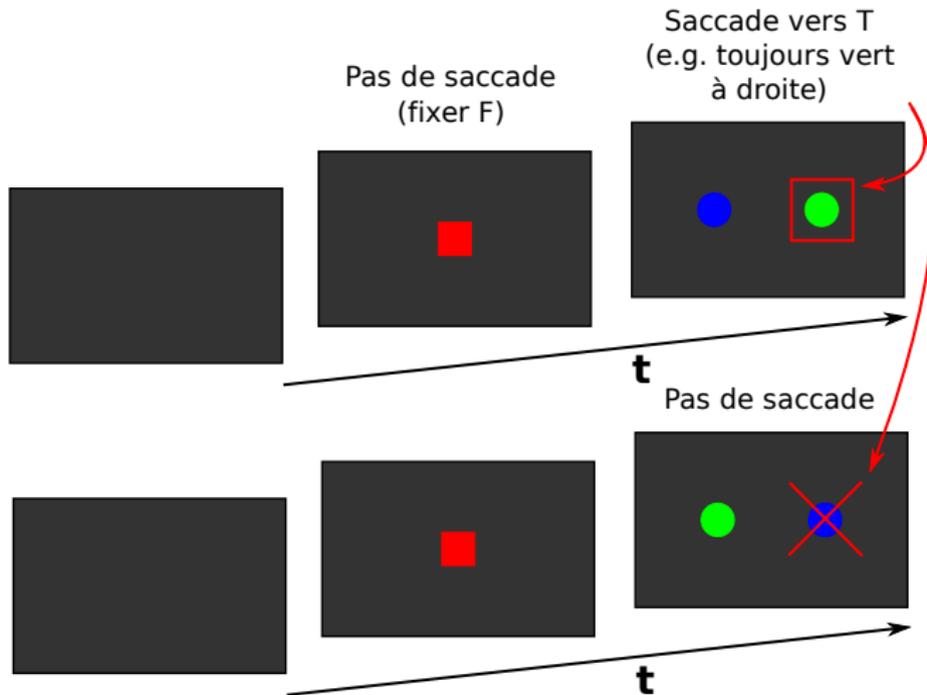
Récompense non-spatiale



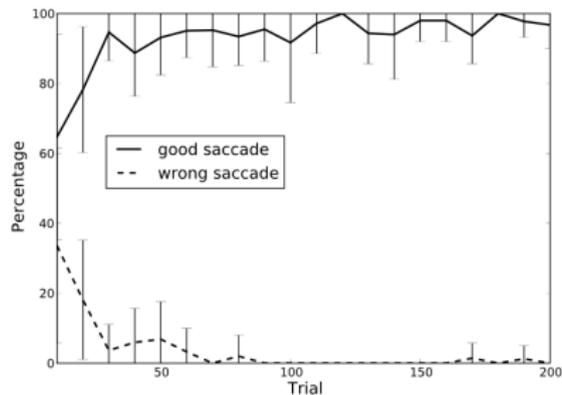
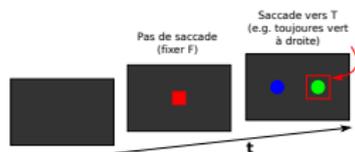
Récompense non-spatiale : résultats



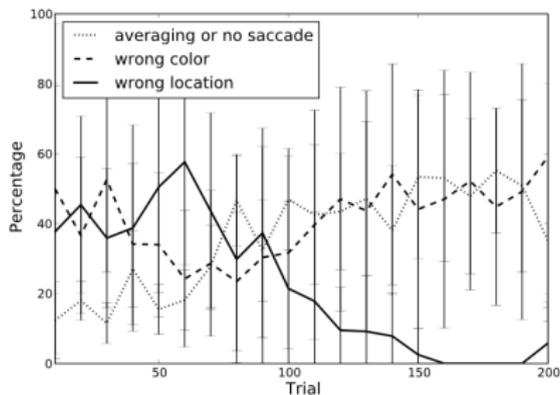
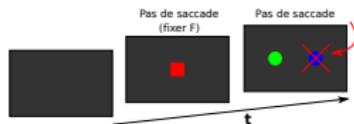
Combinaison



Combinaison : résultats du cas positif



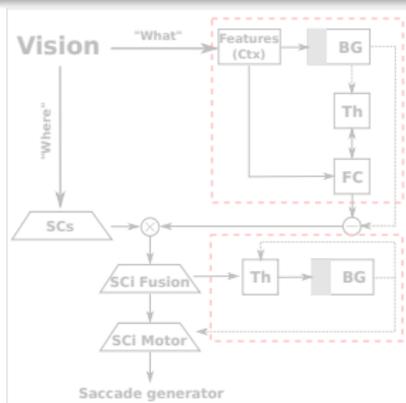
Combinaison : résultats du cas négatif



Discussion

Contributions

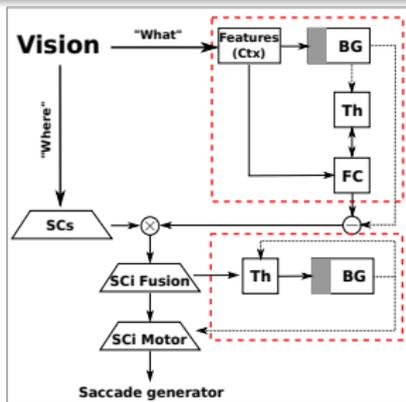
- Selection sous-corticales (McPeck and Keller, 2002)
- Pas d'exploration explicite (implémentation robotique)
- Apprentissage spatial > apprentissage non-spatial (prédiction à tester)



Discussion

Contributions

- Selection sous-corticales (McPeck and Keller, 2002)
- Pas d'exploration explicite (implémentation robotique)
- Apprentissage spatial > apprentissage non-spatial (prédiction à tester)



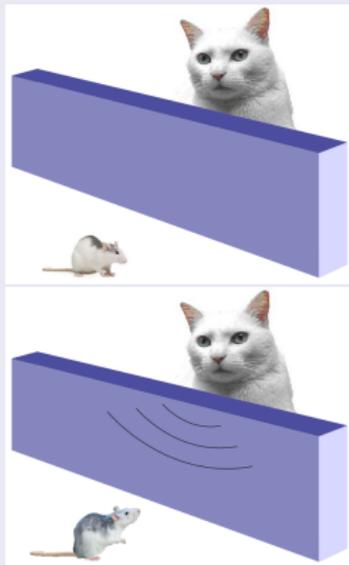
Discussion

Limites

- Système uniquement réactif
- Tâche impliquant la mémoire
- Exploration et algorithme d'apprentissage

Intérêts scientifiques

Intégration multi-sensorielle



- Perception essentiellement multimodale
- Colliculus supérieur zone d'intégration primaire (reflex, détection)

Contexte scientifique : phénomènes connus

Niveau neuronal

- Amélioration multi-sensorielle MSE (Stein and Meredith, 1993)
- Efficacité inverse (effet sur- ou sous-additif)
- Capacités multimodales dépendent du cortex (Jiang et al., 2001)

Niveau comportemental

- Intégration optimale (Knill and Richards, 1996)
- Temps de réaction (Hughes et al., 1994)

Objectifs

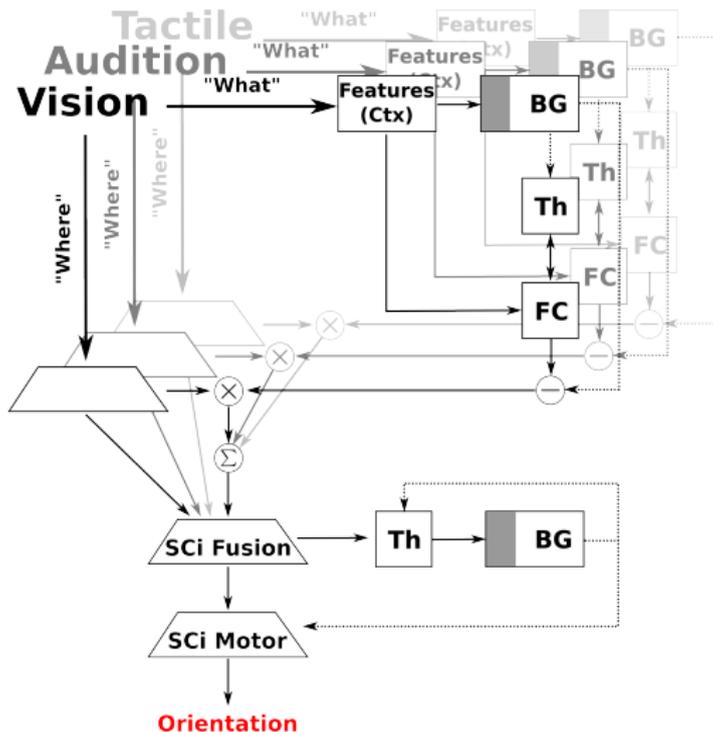
- Étendre le modèle de SC
- Reproduire certains comportements (neurophysiologie)
- Tester ce modèle sur un robot

État de l'art

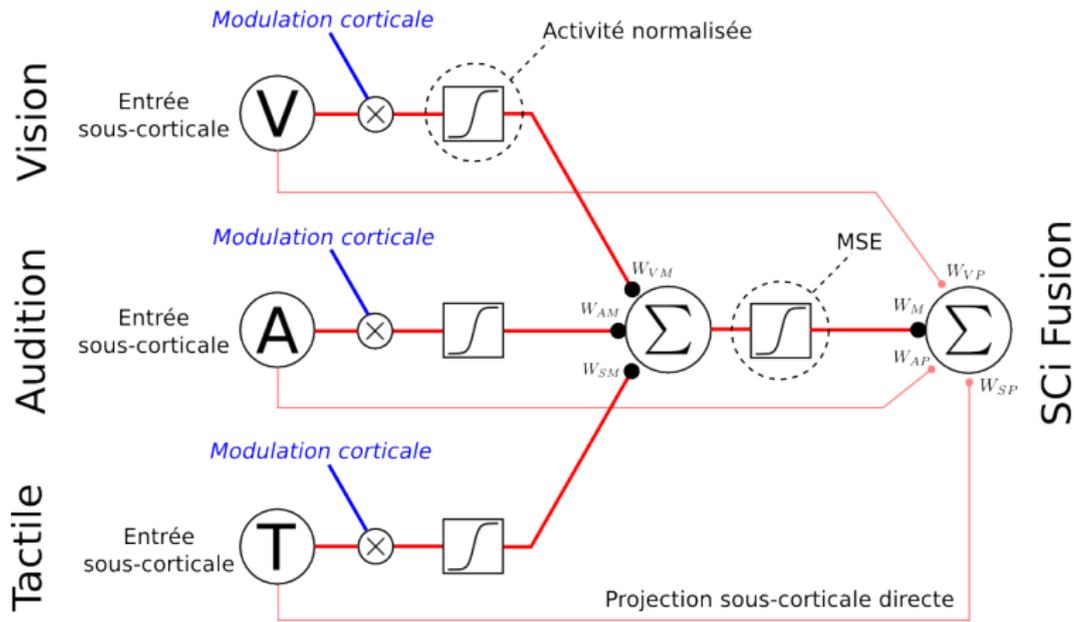
2 approches

- Approches Bayesienne
(Anastasio et al., 2000; Patton and Anastasio, 2003;
Denève and Pouget, 2004) ...
- Approche neuronale
(Grossberg et al., 1997; Anastasio and Patton, 2003;
Cuppini et al., 2010) ...

Modèle : généralisation du modèle de saccades



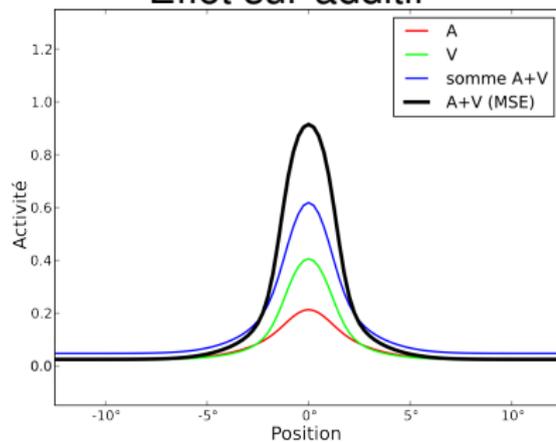
Modèle : convergence neuronale



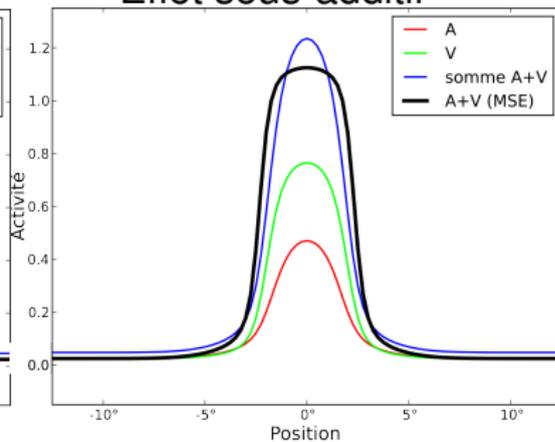
Résultats : simulation

- Amélioration multi-sensorielle

Effet sur-additif

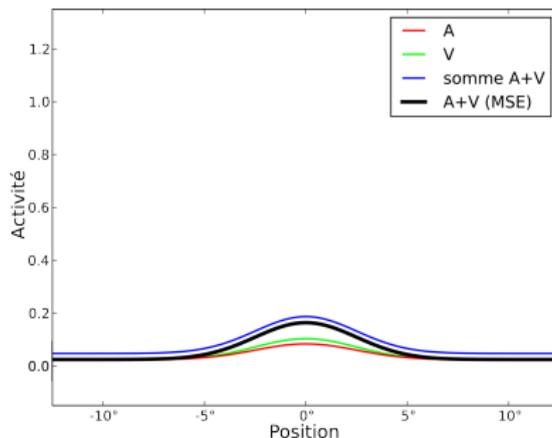


Effet sous-additif

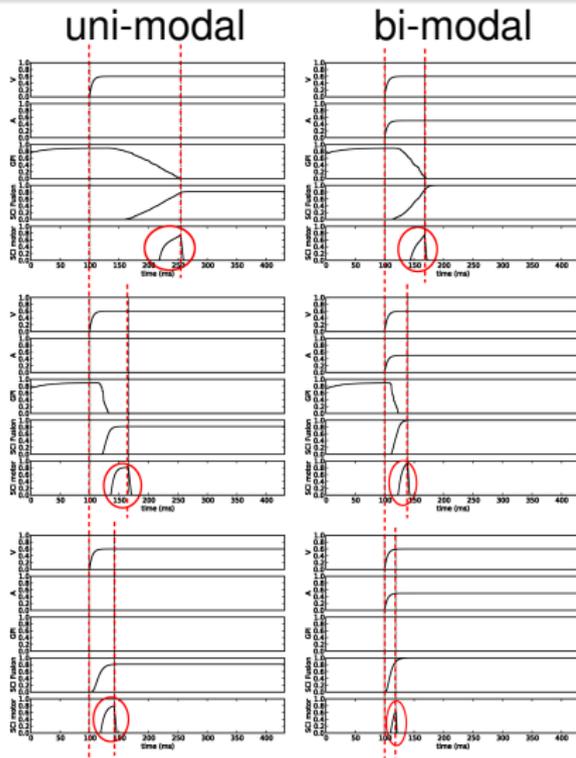


Comportement au niveau neuronal : résultats

- Capacités multimodales dépendent du cortex



Temps de réaction : résultats

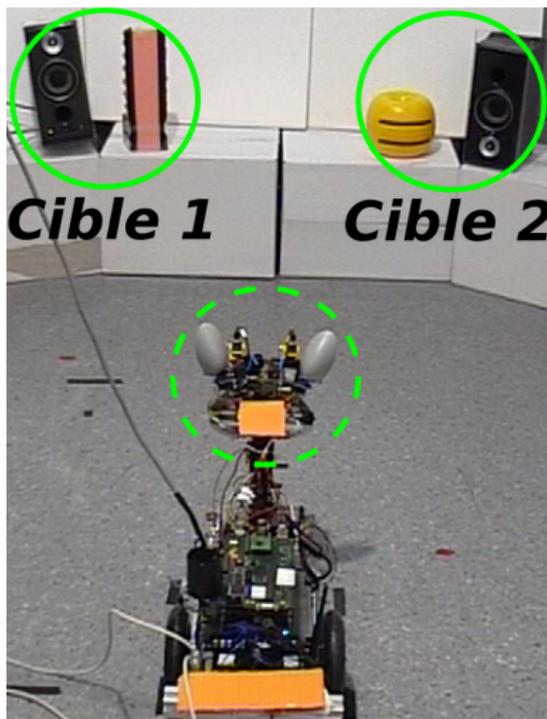


• avant apprentissage

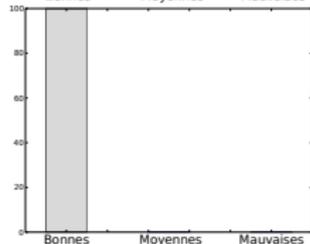
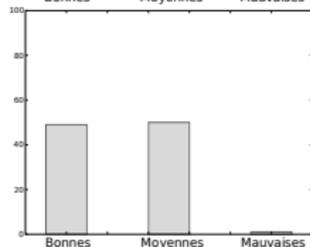
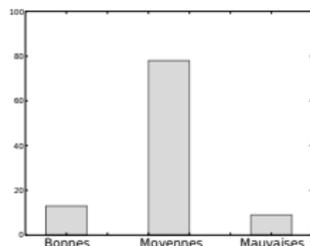
• après apprentissage

• sans BG

Comportement : protocole

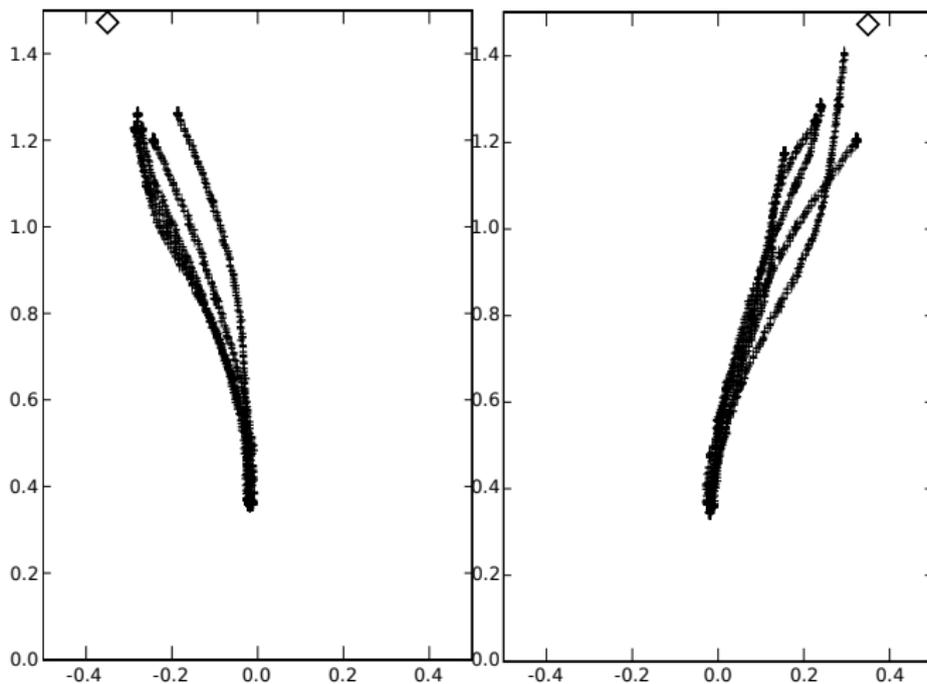


Comportement : détection et effet de l'apprentissage

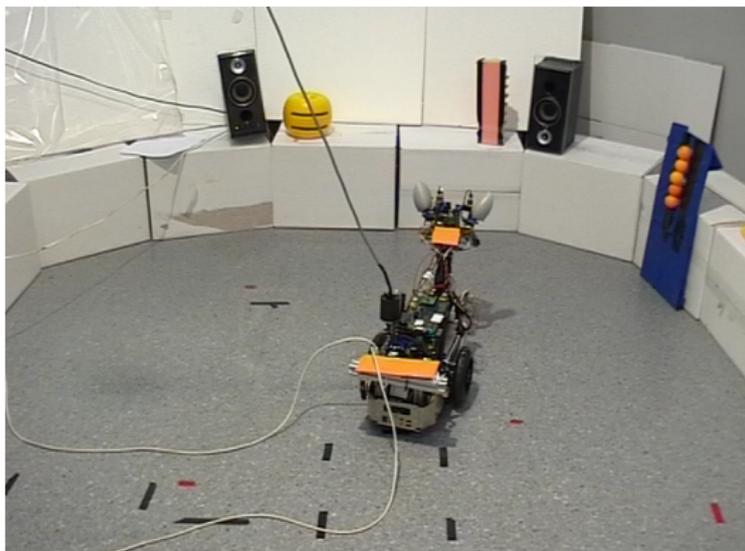


- stimuli V+A avant apprentissage
→ saccades moyennes
- après apprentissage (V et A non concordant)
→ saccades moyennes ou bonnes saccades
- après apprentissage (V et A concordant)
→ aucune erreur

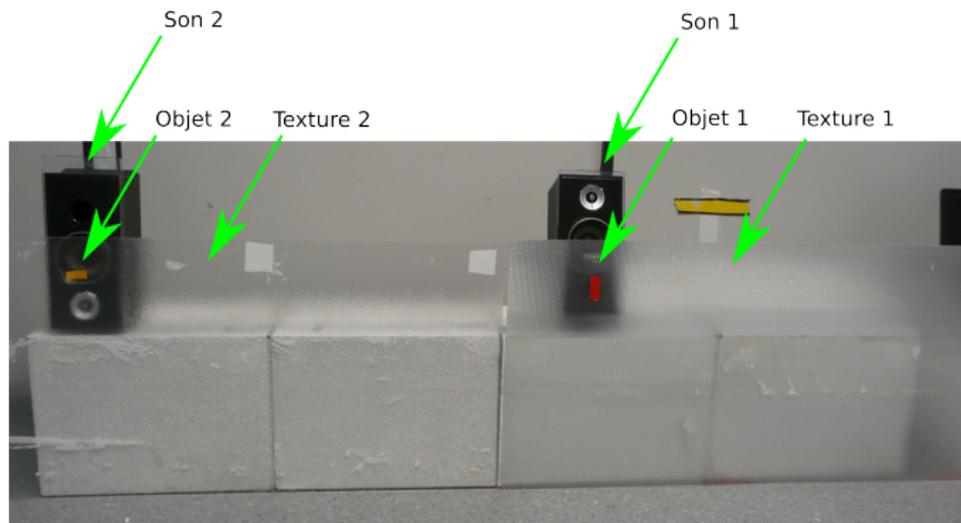
Comportement : exemple de trajectoires



Comportement : exemple de trajectoires

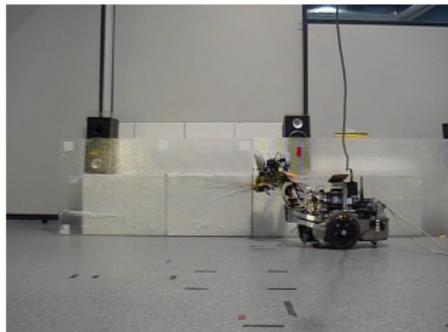


Comportement : expérience tri-modale



- 10 expériences par cas = 80 expériences
- Combinaison des 3 stimuli appris (T1-V1-A1) :
→ arrêt du robot

Comportement : expérience tri-modale (résultats)



Nombre de bons comportements obtenus

T1	A1	A2	T2	A1	A2
V1	10	10	V1	9	10
V2	10	10	V2	10	10

→ 1 erreur sur 80 expériences

Discussion

Contributions

- Reproduit les principaux phénomènes
- Intérêt comportemental (détection. . .)
- Approche bayésienne de l'intégration (représentation optimale vs. décision)

Limites

- Suppression intra-modale
- Temps de réaction avec distracteur

Discussion générale : contributions

Biologie

- Vibrisses : possible réconciliation de 2 hypothèses (« résonance » et « signature dynamique »)
- Exploration du lien entre tactile et audition
- Génération de saccades (sélection dans SC...)
- Intégration multimodale dans SC (rôle de la sélection...)

Robotique

- Sens tactile pour robot mobile (textures...)
- Localisation et séparation de sources sonores
- Boucle sensori-motrice d'orientation

Conclusion : ce qu'il reste à faire

Benoît Girard :
motivations,
sélection de l'action

Loïc Lachèze :
motivations, navigation



Mehdi Khamassi :
apprentissage par
renforcement

Louis-Emmanuel Martinet :
planification

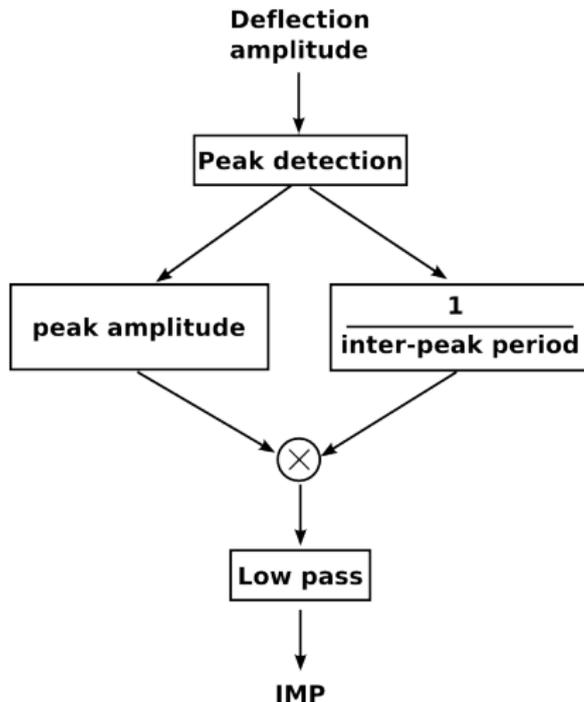
Laurent Dollé :
sélection de stratégies
de navigation

(Ken Caluwaerts, 2010)

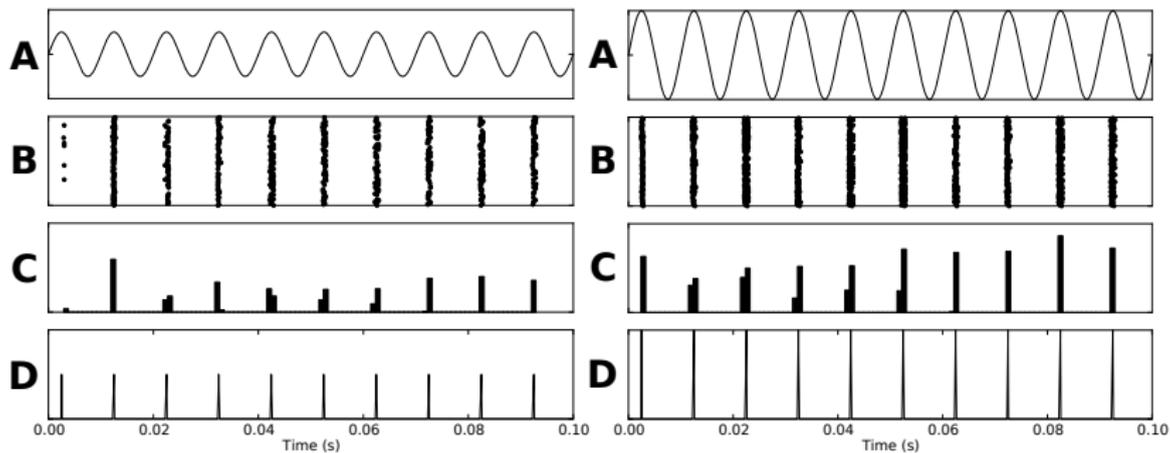
- Navigation
- Contrôle *top-down* (représentation multi-modale)
- Motivations



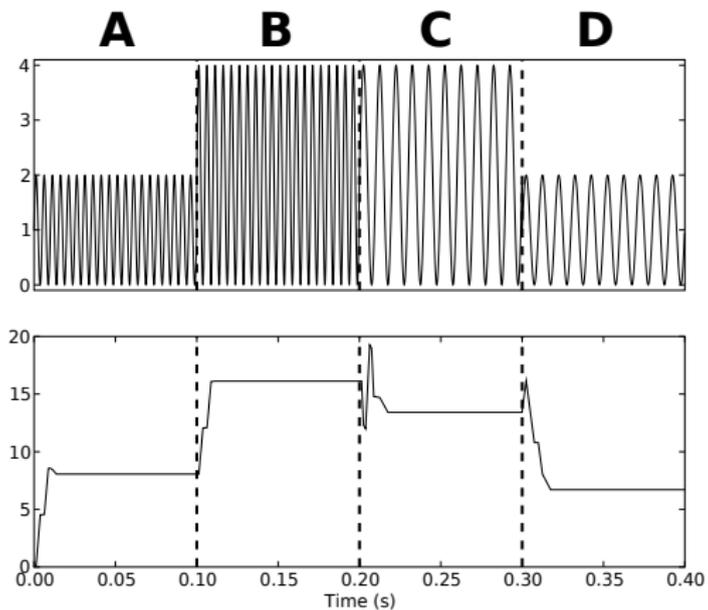
Annexe : algorithme IMP



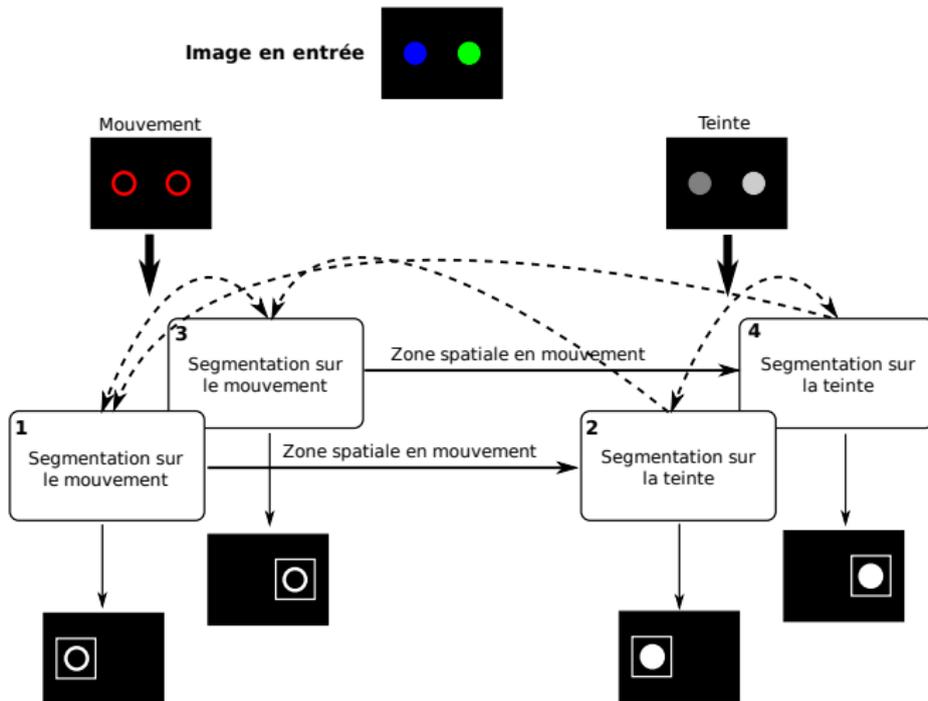
Annexe : comparaison pics/mécanorécepteurs



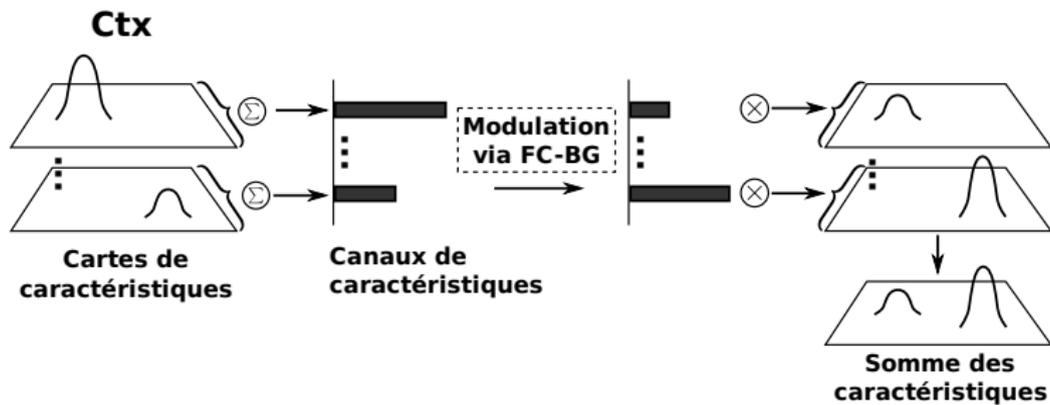
Annexe : simulation IMP



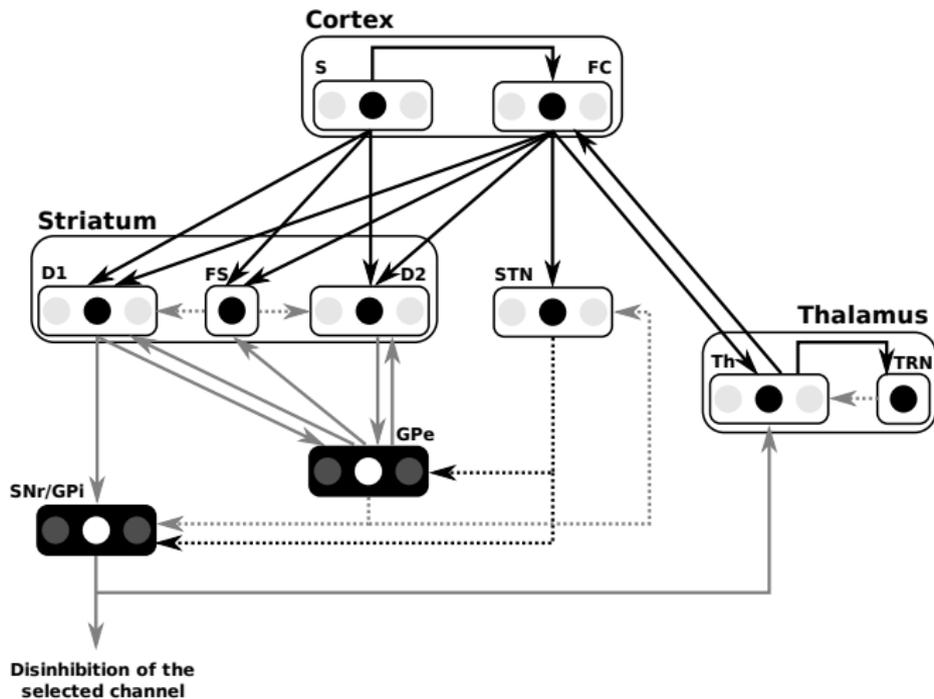
Annexe : algorithme système visuel



Annexe : transformation « caractéristiques vers spatial »

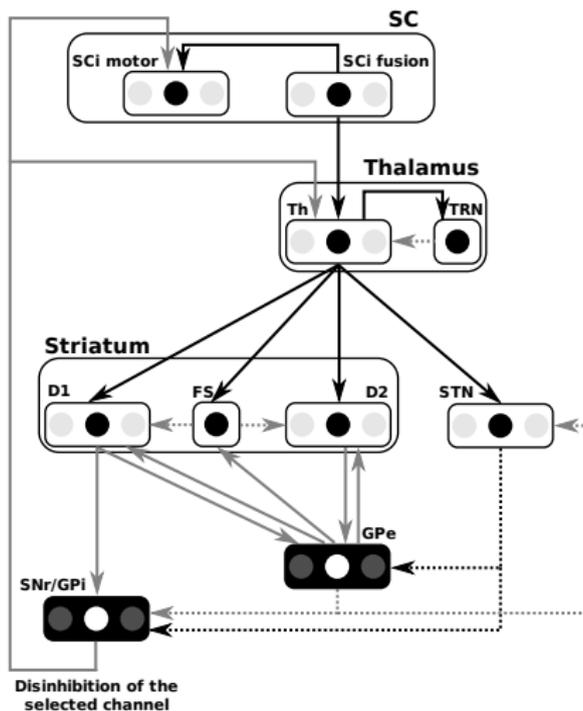


Annexe : boucle CBTC

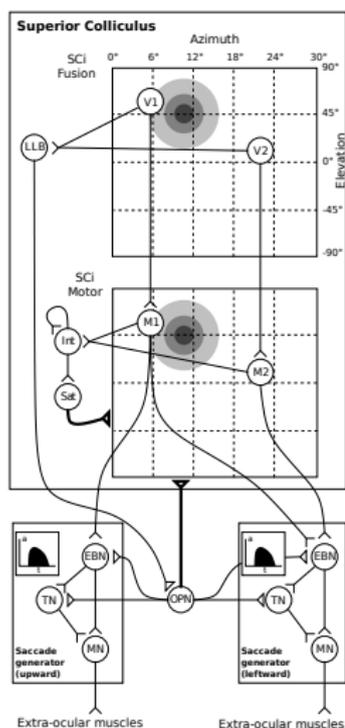


Adapté de (Girard et al., 2008)

Annexe : boucle STBS



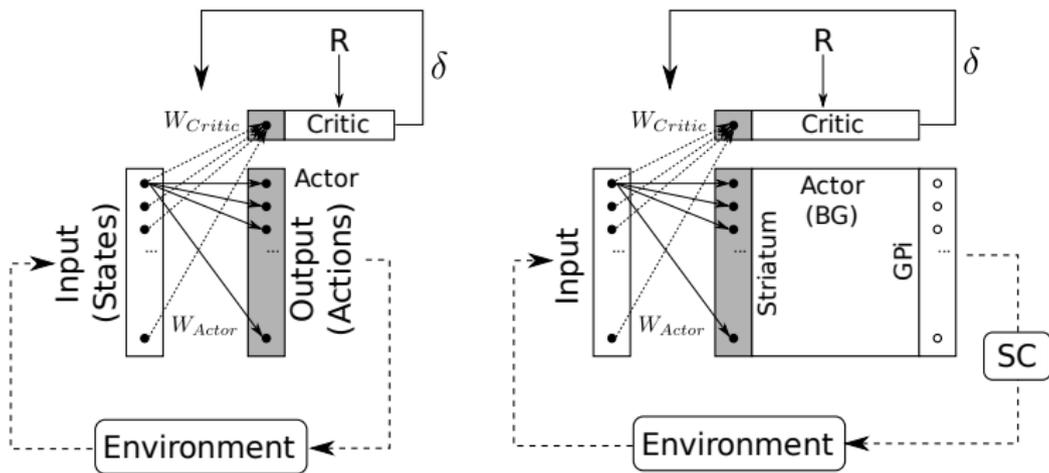
Annexe : SC couche motrice



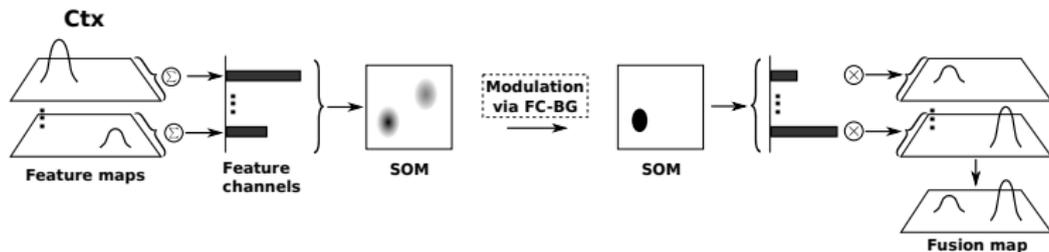
Adapté de (Tabareau et al., 2007)

- Mapping linéaire
- Transformation spatio-temporelle
- Modèle mécanique simple de l'œil

Annexe : acteur-critique



Annexe : transformation « caractéristiques vers spatial » avec SOM



Anastasio, T., Patton, P., and Belkacem-Boussaid, K. (2000).

Using bayes' rule to model multisensory enhancement in the superior colliculus.

Neural Computations, 12(5) :1165–1187.

Anastasio, T. J. and Patton, P. E. (2003).

A two-stage unsupervised learning algorithm reproduces multisensory enhancement in a neural network model of the corticotectal system.

Journal of Neuroscience, 23 :6713–6727.

Arabzadeh, E., Panzeri, S., and Diamond, M. E. (2004).

Whisker Vibration Information Carried by Rat Barrel Cortex Neurons.

Journal of Neuroscience, 24(26) :6011–6020.

Bernard, M., N'Guyen, S., Pirim, P., Gas, B., and Meyer, J.-A. (2010a).

Phonotaxis behavior in the artificial rat psikharpax.

In *International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, IRIS2010*, Nagoya, Japan.

Bernard, M., N'Guyen, S., Pirim, P., Meyer, J., Guillot, A., and Gas, B. (2010b).

A supramodal vibrissa tactile and auditory model for texture recognition.

In Meyer, Guillot, H., editor, *The Eleventh International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. Springer.

Brown, J., Bullock, D., and Grossberg, S. (2004).

How laminar frontal cortex and basal ganglia circuits interact to control planned and reactive saccades.

Neural Networks, 17(4) :471–510.

Caluwaerts, K. (2010).

Design of a biologically inspired navigation system for the Psikharpax rodent robot.

Master's thesis, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6) - Universiteit Gent.

Carvell, G. and Simons, D. (1990).

Biometric analyses of vibrissal tactile discrimination in the rat.

Journal of Neuroscience, 10(8) :2638–2648.

Chambers, J., Gurney, K., Humphries, M., and Prescott, A. (2005).

Mechanisms of choice in the primate brain : a quick look at positive feedback.

In Bryson, J., Prescott, T., and Seth, A., editors, *Modelling Natural Action Selection : Proceedings of an International Workshop*, pages 45–52, Brighton, UK. AISB Press.

Cuppini, C., Ursino, M., Magosso, E., Rowland, B. a., and Stein, B. E. (2010).

An emergent model of multisensory integration in superior colliculus neurons.

Frontiers in integrative neuroscience, 4(March) :6.

Denève, S. and Pouget, A. (2004).

Bayesian multisensory integration and cross-modal spatial links.

Journal of Physiology Paris, 98(1-3) :249–258.

Dominey, P. F. and Arbib, M. A. (1992).

A cortico-subcortical model for generation of spatially accurate sequential saccades.

Cerebral Cortex, 2 :153–175.

Felsen, G. and Mainen, Z. F. (2008).

Neural substrates of sensory-guided locomotor decisions in the rat superior colliculus.

Neuron, 60(1) :137–48.

Fend, M. (2005).

Whisker-based texture discrimination on a mobile robot.

Advances in Artificial Life - Proceedings of the 8th European Conference on Artificial Life (ECAL), pages 302–312.

Fend, M., Bovet, S., Yokoi, H., and Pfeifer, R. (2003).

An active artificial whisker array for texture discrimination.

In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, volume II, pages 1044–1049.

Fox, C. W., Mitchinson, B., Pearson, M. J., Pipe, A. G., and Prescott, T. J. (2009).
Contact type dependency of texture classification in a whiskered mobile robot.
Autonomous Robots, 26(4) :223–239.

Foxe, J. J. (2009).
Multisensory integration : frequency tuning of audio-tactile integration.
Current biology, 19(9) :R373–5.

Girard, B., Tabareau, N., Pham, Q., Berthoz, A., and Slotine, J.-J. (2008).
Where neuroscience and dynamic system theory meet autonomous robotics : a contracting basal ganglia model
for action selection.
Neural Networks, 21(4) :628–641.

Grossberg, S., Roberts, K., Aguilar, M., and Bullock, D. (1997).
A neural model of multimodal adaptive saccadic eye movement control by superior colliculus.
Journal of Neuroscience, 17(24) :9706–9725.

Guic-Robles, E., Valdivieso, C., and Guarjardo, G. (1989).
Rats can learn a roughness discrimination using only their vibrissal system.
Behavioural Brain Research, 31(3) :285–289.

Hikosaka, O., Sakamoto, M., and Usui, S. (1989).
Functional properties of monkey caudate neurons. I. Activities related to saccadic eye movements.
Journal of Neurophysiology, 61(4) :780–798.

Hipp, J., Arabzadeh, E., Zorzin, E., Conradt, J., Kayser, C., Diamond, M. E., and Konig, P. (2006).
Texture Signals in Whisker Vibrations.
Journal of Neurophysiology, 95(3) :1792–1799.

Hughes, H., Reuter-Lorenz, P., Nozawa, G., and Fendrich, R. (1994).
Visual-auditory interactions in sensorimotor processing : saccades versus manual responses.
Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 20(1) :131–153.

Jiang, W., Wallace, M. T., Jiang, H., Vaughan, W. J., and Stein, B. E. (2001).
Two Cortical Areas Mediate Multisensory Integration in Superior Colliculus Neurons.
Journal of Neurophysiology, 85 :506–522.

Kim, D. and Moller, R. (2004).
A biomimetic whisker for texture discrimination and distance estimation.
From Animals to Animats 8, pages 140–149.

Knill, D. C. and Richards, W. (1996).
Perception as Bayesian Inference.
Cambridge University Press.

McPeck, R. M. and Keller, E. L. (2002).
Saccade target selection in the superior colliculus during a visual search task.
J Neurophysiol, 88(4) :2019–2034.

Montague, P. R., Dayan, P., and Sejnowski, T. J. (1996).
A framework for mesencephalic dopamine systems based on predictive hebbian learning.
Journal of Neuroscience, 16(5) :1936–1947.

Moore, C. I. and Andermann, M. L. (2005).
The vibrissa resonance hypothesis.
chapter 2, pages 21–60. CRC Press.

Neimark, M. A., Andermann, M. L., Hopfield, J. J., and Moore, C. I. (2003).
Vibrissa resonance as a transduction mechanism for tactile encoding.
The Journal of Neuroscience, 23(16) :6499–6509.

N'Guyen, S., Pirim, P., and Meyer, J.-A. (2009).
Elastomer-based tactile sensor array for the artificial rat psikharpax.
In *ISEF 2009 - XIV International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering*.

N'Guyen, S., Pirim, P., and Meyer, J.-A. (2010a).

Tactile texture discrimination in the robot-rat psikharpax.

In *BIOSIGNALS 2010, Third International Conference on Bio-Inspired Systems and Signal Processing*, Valencia, Spain.

N'Guyen, S., Pirim, P., Meyer, J.-A., and Girard, B. (2010b).

An integrated neuromimetic model of the saccadic eye movements for the psikharpax robot.

In *From Animals to Animals 11 : Proceedings of the Eleventh International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*.

Patton, P. E. and Anastasio, T. J. (2003).

Modeling cross-modal enhancement and modality-specific suppression in multisensory neurons.

Neural computation, 15(4) :783–810.

Pearson, M. J., Pipe, A. G., Melhuish, C., Mitchinson, B., and Prescott, T. J. (2007).

Whiskerbot : A Robotic Active Touch System Modeled on the Rat Whisker Sensory System.

Adaptive Behavior, 15(3) :223–240.

Schiller, P. H. (1972).

The role of the monkey superior colliculus in eye movement and vision.

Investigative ophthalmology, 11(6) :451–60.

Seth, A. K., McKinstry, J. L., Edelman, G. M., and Krichmar, J. L. (2004).

Spatiotemporal processing of whisker input supports texture discrimination by a brain-based device.

In Schall, S., Ijspeert, A., Billard, A., Vijayakumar, S., Hallam, J., and Meyer, J., editors, *From Animals to Animals 8. Proc. of the 8th Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior*. MA : MIT PRESS.

Stein, B. E. and Meredith, M. A. (1993).

The Merging of the Senses.

MIT Press.

Tabareau, N., Bennequin, D., Berthoz, A., Slotine, J.-J., and Girard, B. (2007).
Geometry of the superior colliculus mapping and efficient oculomotor computation.
Biological Cybernetics, 97(4) :279–292.

Yau, J. M., Olenczak, J. B., Dammann, J. F., and Bensmaia, S. J. (2009).
Temporal frequency channels are linked across audition and touch.
Current Biology, 19 :561–566.