



HAL
open science

Mémoires déclarative et procédurale pour la navigation autonome d'un animat

Nicolas P. Rougier

► **To cite this version:**

Nicolas P. Rougier. Mémoires déclarative et procédurale pour la navigation autonome d'un animat. Intelligence Artificielle Située, Jean-Arcady Meyer et Alexis Drogoul, 1999, none, 18 p. inria-00107691

HAL Id: inria-00107691

<https://inria.hal.science/inria-00107691v1>

Submitted on 19 Oct 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mémoires déclarative et procédurale pour la navigation autonome d'un animal

Nicolas Rougier

*Equipe CORTEX
LORIA
B.P. 239
54506 Vandoeuvre-lès-Nancy, France
e-mail : Nicolas.Rougier@loria.fr*

RÉSUMÉ. Parmi les différentes stratégies de navigation autonome issues du monde animal, il semble que celles à base de carte cognitive soient les plus performantes puisqu'elles permettent de rallier à tout moment un lieu précédemment visité. Cette tâche de navigation autonome, à l'instar de la plupart des tâches cognitives, requiert l'utilisation d'une mémoire déclarative et d'une mémoire procédurale dont le fonctionnement est généralement attribué aux structures cérébrales de l'hippocampe et du cortex. A la lumière du fonctionnement et de la modélisation de chacun de ces deux systèmes, cet article propose un modèle de coopération entre ces deux structures autorisant la navigation autonome à l'aide d'une carte cognitive topologique distribuée.

ABSTRACT. Among the different autonomous navigation strategies available in the animal world, it seems that those based on cognitive maps are the most useful since they allow to reach a known place anytime. This task of autonomous navigation, like most other cognitive tasks, requires the use of both declarative and procedural memory whose functioning is generally attributed to hippocampus and cortex neuronal structures. To throw light on the functioning of each neuronal system, this paper proposes a model of cooperation between these structures allowing autonomous navigation using a distributed topological cognitive map.

MOTS-CLÉS: mémoire déclarative, mémoire procédurale, hippocampe, cortex, navigation, carte cognitive, carte topologique

KEY WORDS: declarative memory, procedural memory, hippocampus, cortex, navigation, cognitive map, topological map

1. Introduction

Si la majeure partie du règne animal est aujourd'hui capable de se mouvoir dans un environnement de façon précise et robuste, cette même navigation autonome reste un défi à relever pour les robots et autres animats issus du domaine de l'intelligence artificielle. Ainsi, parmi les diverses techniques de navigation existantes, il semble que celles requérant l'utilisation d'une carte cognitive soient les plus intéressantes au sens où elles offrent au minimum la capacité de rallier un lieu connu à partir d'un autre lieu pour peu que le chemin ait été utilisé auparavant. Par ailleurs, les nombreuses recherches dans le domaine des neuro-sciences semblent désormais offrir la matière nécessaire à la conception de nouveaux modèles d'inspiration biologique. En fait, depuis que les cellules de lieux furent prédites et détectées au sein de l'hippocampe de certains rongeurs, de nombreuses modélisations de l'hippocampe isolé ont vu le jour en se basant essentiellement sur cet aspect purement spatial, autorisant ainsi la navigation par l'utilisation de cartes cognitives. Or, des études chez les primates et les sujets humains ont mis en évidence un rôle plus générique de l'hippocampe : celui-ci serait en effet responsable de la mémoire déclarative dans son ensemble alors que la mémoire non déclarative (ou procédurale) résiderait dans les structures du cervelet et du néocortex. Le propos de cet article est donc de montrer comment la coopération effective d'un modèle d'hippocampe générique et d'un modèle cortical permet de construire et d'utiliser une carte cognitive topologique de façon distribuée. Le modèle est illustré par une tâche simple mettant en avant les mécanismes corticaux

2. La navigation autonome

2.1. *Différentes stratégies*

La survie de la majeure partie des animaux dépend directement de leur capacité à se mouvoir dans un environnement connu (ou inconnu) afin d'être en mesure de trouver (ou de rejoindre), de façon précise et sûre, des lieux spécifiques tels que l'habitat ou le lieu de nourriture. Or, les différentes études menées sur la navigation animale ont permis de mettre en évidence un large éventail de techniques autorisant la navigation autonome. Cependant, malgré la nature très diverse des mécanismes impliqués, la navigation autonome peut être appréhendée selon la hiérarchie à 4 niveaux proposée par [TRU 97a] :

- **acquisition** : L'animal peut se déplacer de façon à retrouver une situation perceptive mémorisée
- **orientation** : L'animal peut s'orienter relativement à des places, indépendamment de l'orientation.
- **navigation topologique** : L'animal peut se déplacer le long de chemins connus

- **navigation métrique** : L’animal peut se déplacer le long de chemins connus et/ou en utilisant des raccourcis

En amont de ces 4 types de navigation, il est requis pour l’animal de posséder des aptitudes minimales concernant la locomotion. Ainsi, il est généralement considéré qu’il est en mesure de s’approcher d’une cible ou bien encore de la fuir. Si [FRE 99] montre comment une telle aptitude peut être acquise sans apprentissage spatial explicite, il souligne aussi les limitations intrinsèques d’une navigation reposant seulement sur un tel mécanisme : lorsque le but n’est plus perçu, l’animal ne “sait” pas où chercher. De même, la navigation à base d’acquisition, si elle autorise une plus large autonomie, requiert un milieu particulièrement adapté afin que l’animal puisse survivre. L’animal est à même de mémoriser un ensemble de perceptions caractéristiques à un lieu (sans nécessairement effectuer de traitements spatiaux), mais lorsque ces différentes perceptions ne sont plus perçues, le lieu ne peut plus être retrouvé de façon directe. La navigation par orientation requiert quant à elle la mémorisation d’informations spatiales. L’animal apprend des places (indépendamment de l’orientation) et associe à chacune de ces places une action particulière par rapport à une orientation de référence. Il n’existe pas de réel plan d’action : à chaque lieu est associée une action conduisant au lieu suivant et de proche en proche au but recherché. Ce type de navigation, s’il est plus robuste que la navigation par acquisition, ne permet donc pas l’établissement d’une réelle stratégie. Pour ce faire, il est nécessaire de mémoriser des informations spatiales de plus haut niveau concernant l’environnement dans lequel l’animal évolue. C’est ce qu’on l’on appelle généralement la “carte cognitive”, bien que le terme soit controversé.

2.2. *Utilisation d’une carte cognitive*

Ainsi que le souligne [BEN 96], Le terme de carte cognitive a été cité pour la première fois par [TOL 48] qui la définissait comme une représentation de l’environnement comprenant les routes, chemins et diverses relations de l’environnement dont se servait l’animal pour décider où aller. L’une des caractéristiques essentielles de cette carte cognitive est la capacité à utiliser des raccourcis d’un lieu vers un autre (cette notion de raccourcis sera développée plus tard par [O’K 78]). Bien que l’existence et l’utilisation d’une telle carte cognitive par les animaux ne soit pas encore démontrée, il existe aujourd’hui de fortes présomptions allant dans ce sens. La hiérarchie des navigations proposée par [TRU 97a] englobe cette notion de carte cognitive au niveau de la navigation topologique et de la navigation métrique. Ainsi, la carte minimaliste est ce que [ARB 77] appellent le graphe du monde. C’est une carte purement topologique où chaque lieu peut être représenté par un noeud et chaque chemin par un lien uni ou bi-directionnel (cf. fig. 1).

Lorsqu’une carte topologique de l’environnement est connue, elle permet à l’ani-

mal de se déplacer d'un lieu à un autre à la condition que ces deux lieux soient connectés par un nombre quelconque de liens. La séquence résultante ne sera pas optimale dans le sens où l'animal ne dispose d'aucune information spatiale lui autorisant la prise en compte de raccourcis. Or, lorsqu'un animal utilise la navigation métrique, il est en mesure d'inférer et d'utiliser de tels raccourcis : il n'est plus nécessaire d'utiliser seulement des séquences apprises, il est possible de "construire des chemins à la demande". Cependant, [MAR 98] montre qu'il existe une hiérarchisation des géométries, de la moins contraignante (la géométrie topologique) à la plus contraignante (la géométrie métrique) et que le passage de la première à la dernière nécessite un nombre important de notions qu'il est nécessaire d'appréhender.

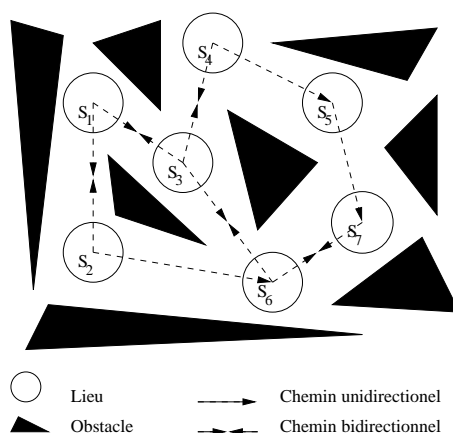


Figure 1. Exemple de représentation topologique de l'environnement : chaque lieu est associé à un noeud et chaque chemin est associé à un lien. Le lien entre deux lieux doit être appris dans les deux sens. Ainsi, la carte actuelle ne permet pas d'aller de S_6 vers S_2 de façon directe

Or, [BEN 96] suggère qu'il n'est pas nécessaire de recourir à la notion de cartes métriques pour justifier l'aptitude à utiliser des raccourcis spatiaux. Ainsi, un animal doté d'une carte purement topologique et de la capacité à acquérir un but perçu devrait être en mesure d'exhiber un comportement fortement similaire à celui d'un animal utilisant une carte métrique. Les nombreuses études de la navigation autonome chez les animaux offrent désormais de fortes présomptions quant aux structures cérébrales impliquées et permettent aujourd'hui la modélisation et l'intégration de ces structures au sein d'un modèle cohérent.

3. Des structures cérébrales impliquées dans la navigation

Un ensemble de données cliniques a permis de mettre en exergue la nature duale de la mémoire. Ainsi, il a été observé que le patient H.M., qui avait subi une abla-

tion de l'hippocampe, des noyaux amygdaliens et du gyrus, n'était plus en mesure de mémoriser efficacement des faits explicites simples alors que dans le même temps, les souvenirs pré-opératoire demeuraient intacts et l'acquisition de nouvelles compétences était toujours possible. De telles observations ont amené à considérer que le système mnésique ne pouvait être unifié au sein d'une seule et même structure à même de rendre compte de l'ensemble de ses aptitudes.

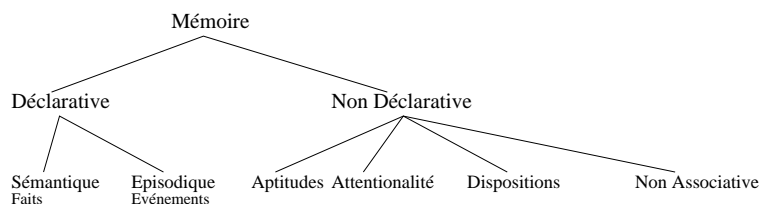


Figure 2. Une taxonomie de la mémoire selon [SQU 92]

Ainsi, comme le souligne [SQU 92], on distingue deux grands types de mémoires (cf. fig. 2) qui coopèrent dans la plupart des tâches cognitives. Par exemple, la construction d'une carte cognitive requiert d'une part l'utilisation de la mémoire déclarative pour pouvoir mémoriser des perceptions (i.e. des lieux) et d'autre part l'utilisation de la mémoire procédurale pour pouvoir mémoriser les chemins et utiliser la carte ainsi construite. Or, si la mémoire déclarative autorise le rappel de faits et d'événements de façon consciente (il est ainsi facile de se rappeler du menu du repas de la veille ou d'un numéro de téléphone), la mémoire non déclarative, ou procédurale, engage quant à elle des processus généralement non conscients permettant de se rappeler principalement de façons de procéder, de manières de faire. Du fait de cette nature différente, ces deux types de mémoires ne mettent pas en jeu les mêmes mécanismes de stockage et d'apprentissage et ne reposent pas non plus sur les mêmes structures cérébrales. Si le siège de la mémoire procédurale semble résider dans les structures corticales du cerveau, la mémoire déclarative semble résider quant à elle dans la structure de l'hippocampe.

3.1. L'hippocampe

Les travaux de [O'K 71, O'K 78] ont permis de prédire et d'observer les cellules de lieux au sein de l'hippocampe des rongeurs. Ces cellules sont fortement liées à la localisation spatiale de l'animal de telle sorte qu'elles ne s'activent que lorsque l'animal se trouve à une place spécifique liée à ces cellules et couvrent en général une zone qui est de l'ordre de plusieurs fois la taille du rongeur. Ces travaux ont donné naissance à de nombreuses modélisations de l'hippocampe en se basant essentiellement sur l'aspect spatial, permettant ainsi une navigation efficace grâce à l'utilisation de cartes cognitives (cf. [MCN 90, GAU 99, TRU 97b, RED 97]). Simultanément, des

études chez les primates et les sujets humains ont mis en évidence un rôle moins contingencé de l'hippocampe. Ainsi, parmi les différentes théories concernant l'hippocampe (voir [SCH 97]), la théorie selon laquelle l'hippocampe serait impliqué dans la construction de la mémoire déclarative [SQU 92] est aujourd'hui largement répandue et semble accréditée par de nombreuses expériences. [MAR 71] propose une théorie concernant le rôle crucial de l'hippocampe dans la consolidation de la mémoire. Il suggère que l'hippocampe stockerait les expériences (multimodales) et autoriserait leur transfert au sein du cortex. L'idée même que **l'hippocampe est le superviseur du cortex** est maintenant largement approuvée par nombre de chercheurs du domaine [ROL 96, MUR 96, MIL 89, MCC 94]. En fait, la structure du cerveau montre que l'hippocampe est lié à l'ensemble du néocortex via le cortex entorhinal et se trouve donc en mesure de prendre une "photo multimodale" de son contenu, or, photographier ce contenu est équivalent à mémoriser une expérience, car l'ensemble des données perceptives nécessaires seront conservées.

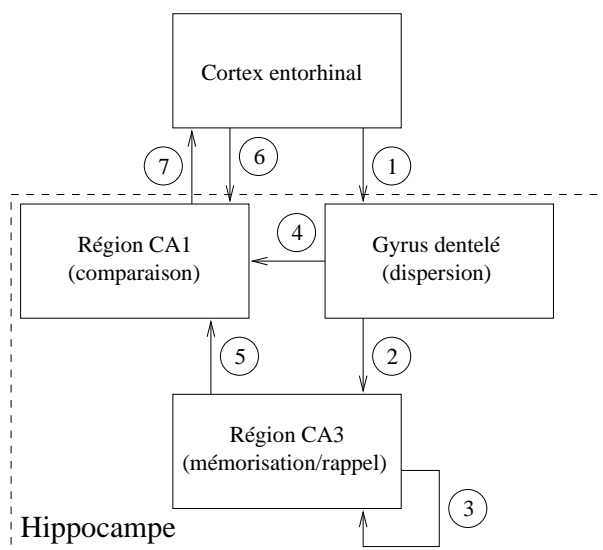


Figure 3. Schéma des connexions entre les différentes structures composant l'hippocampe :
1) Dispersion de l'information corticale au sein du gyrus dentelé **2)** Le gyrus dentelé se projette dans la région CA3 **3)** Les liens récurrents permettent la mémorisation et le rappel des motifs **4), 5) et 6)** La région CA1 reçoit les entrées du gyrus dentelé, de la région CA3 et du cortex entorhinal, permettant ainsi la comparaison du motif cortical original à ce qui est rappelé au niveau de la région CA3 **7)** Après comparaison (rappel/apprentissage), un motif d'activation est réinstancié dans le cortex entorhinal

En fait, cette mémorisation efficace peut être effectuée dans l'hippocampe pour deux raisons principales. Premièrement, le mécanisme de potentialisation à long terme

(LTP pour Long Term Potentiation) des unités hippocampiques autorise le renforcement rapide des connexions, et donc, un nombre restreint de présentation d'un exemple est suffisant pour que celui-ci soit mémorisé. Deuxièmement, la structure même de l'hippocampe ainsi que ses connexions externes vers les autres structures du cerveau lui permettent une mémorisation adaptée (cf. fig 3). Celui-ci est en effet constitué de trois structures principales : le *gyrus dentelé*, la *région CA3* et la *région CA1*. Concernant le rôle de ces structures, la plupart des modèles de l'hippocampe s'accordent sur les points suivants. L'entrée principale du *gyrus dentelé* est constituée par le cortex entorhinal. Or, celui-ci est en relation avec de nombreuses aires corticales et se trouve donc à même de refléter l'activité du cortex. Il en représente une vue multimodale, et donc, la mémorisation d'un motif d'activation du cortex entorhinal revient à mémoriser un motif d'activation du cortex. La première étape de traitement consiste à disperser l'information afin de minimiser les recouvrements entre les différents motifs corticaux, ce qui est assuré par le *gyrus dentelé*. Cette information dispersée peut être alors compressée au sein de la région CA3, tout en préservant la propriété de non-recouvrement. De plus, les nombreuses connexions récurrentes de la région CA3 vont permettre la mémorisation effective ou bien le rappel du motif. Dès lors, la région CA1 est en mesure de comparer le motif original (présent au niveau du cortex entorhinal et du *gyrus dentelé*) au motif proposé par la région CA3 et de conclure de réinstancier ou non le motif mémorisé par la région CA3.

De plus, il existe un phénomène de migration de l'information entre les structures de l'hippocampe et du cortex (voir [MUR 96, O'R 99, MCC 94]). Notamment, il a été montré que si l'ablation de l'hippocampe n'autorise pas la mémorisation de nouveaux faits, elle permet néanmoins le rappel de souvenirs antérieurs. En cela, l'hippocampe joue le rôle de superviseur du cortex : il mémorise de façon rapide l'ensemble des faits et événements et cette mémoire est transférée petit à petit au niveau du cortex, autorisant ainsi une mémorisation explicite à long terme.

3.2. *Le cortex associatif*

Le cortex peut être considéré comme un ensemble d'unités (colonnes corticales) regroupées en aires qui peuvent être de deux types principaux :

- Les aires monomodales : Elles regroupent principalement les aires sensorielles (e.g. visuelles) et effectrices (e.g. motrices)
- Les aires polymodales : Ce sont les aires associatives qui mettent en relation au moins deux autres aires (monomodales ou polymodales)

Les unités corticales possèdent un fonctionnement local identique et seule l'origine des entrées sensorielles de l'aire concernée va déterminer le traitement de l'information.

Les travaux de [BUR 89] ont permis de proposer des modèles de mécanismes locaux d'apprentissage au sein du cortex. Ainsi, au cours de l'apprentissage, les différentes observations du monde extérieur via les entrées sensorielles vont amener les unités corticales à en extraire les régularités, conduisant ainsi à la représentation statistique des corrélations d'informations au sein des aires corticales. Par exemple, si il est observé que l'événement perceptif B (qui est local) suit toujours l'événement perceptif A (lui aussi local), alors il peut être appris que A et B sont corrélés dans le sens $A \rightarrow B$. Cette nature locale de l'apprentissage autorise son utilisation au sein de différents contextes et en ce sens l'apprentissage est procédural puisqu'il peut être utilisé au sein de contextes différents.

D'un point de vue fonctionnel, ces unités corticales peuvent être assimilées à des automates cellulaires susceptibles de se trouver dans 3 états distincts :

- Etat E0 : C'est un état neutre, il correspond à une non-activité de l'unité corticale
- Etat E2 : C'est l'état excité qui correspond à la réalisation d'une perception ou bien au déclenchement d'une action motrice selon le type de la colonne
- Etat E1 : C'est l'état d'appel de la colonne qui correspond à une "demande" d'excitation. Si le contexte actuel autorise l'excitation alors la colonne transitera vers l'état E2, sinon, l'activité d'appel E1 sera transmise à l'ensemble des colonnes voisines.

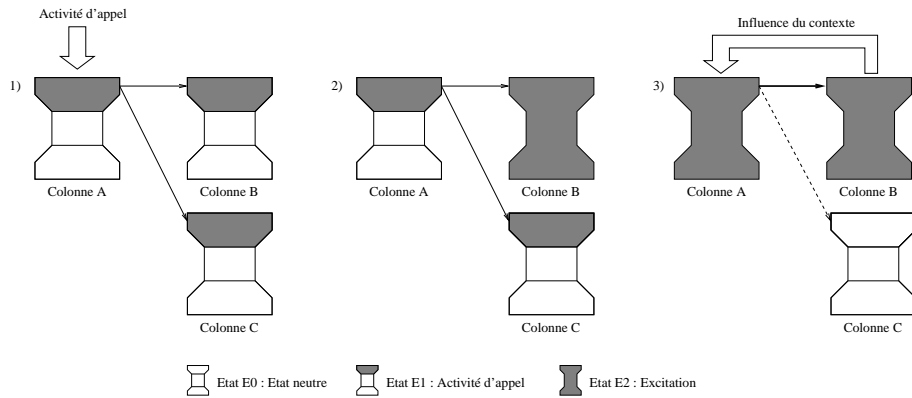


Figure 4. 1) La colonne A reçoit une activité d'appel externe (une colonne voisine par exemple) qui est transmise aux colonnes voisines (ici, les colonnes B et C). **2)** Le contexte actuel autorise l'excitation de la colonne B (par exemple, un mouvement moteur peut être déclenché). **3)** Le changement de contexte induit par l'activation de la colonne B autorise l'excitation de la colonne A . Le lien d'appel de la colonne A vers la colonne B est renforcé alors que celui vers la colonne C est diminué. La colonne A "apprend" ainsi qu'il est préférable d'appeler la colonne B pour pouvoir être excitée

L'activité d'appel représente le coeur du modèle puisqu'elle autorise une recherche guidée par le but. En effet, l'immersion dans un environnement induit l'apprentissage

des différentes régularités sous la forme de séquences causales entre les colonnes (cf. fig 4). Dès lors, un but peut être atteint en initiant une activité d'appel sur les colonnes représentant le but. Dans le cas où le contexte ne permet pas l'atteinte immédiate du but, cette activité d'appel se propage sur l'ensemble des colonnes, jusqu'au moment où une action motrice peut être déclenché dans le contexte actuel, induisant alors un changement de contexte, et donc potentiellement le déclenchement d'une nouvelle action, amenant ainsi le système dans l'état souhaité. Sur la base de cette recherche guidée par le but, les travaux de [FRE 98] ont permis de mettre en évidence des mécanismes purement corticaux autorisant une sélection efficace de l'action.

Cependant, le codage explicite du contexte peut s'avérer nécessaire dans certaines situations ambiguës ainsi que le montre la figure 5.

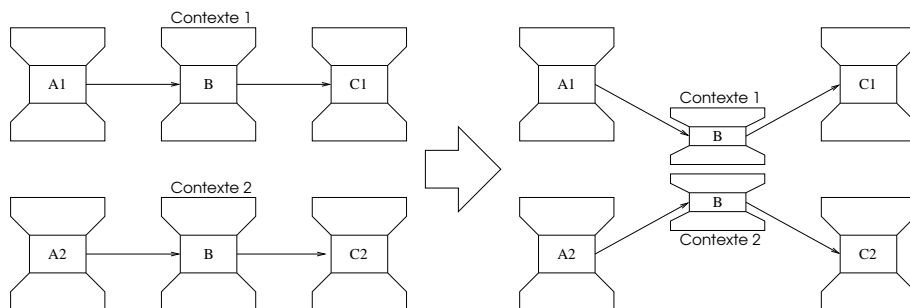


Figure 5. Dans cet exemple, il existe deux séquences utilisant le même état intermédiaire B. Le premier état A₁ provoquera le basculement vers contexte₁ alors que le second état A₂ basculera le contexte courant vers contexte₂. Donc, l'action liée à l'état B conduira à l'état C₁ ou C₂ selon le contexte courant. La spécialisation de la colonne B autorisera l'identification du contexte

Ce même modèle de la colonne corticale propose donc un mécanisme de spécialisation sous la forme de phénomènes d'inhibitions latérales autorisant alors les colonnes à se spécialiser assez finement sur un masque précis d'activités. D'un point de vue computationnel, ce phénomène peut être approximé par une division de la colonne et la spécialisation des entrées par rapport à un contexte.

3.3. Flux d'information entre les différentes structures cérébrales

Selon cette approche fonctionnelle, le flux d'information entre les différentes structures cérébrales peut être comparé à une boucle perception/action (cf. fig 6).

En effet, la perception du monde par exemple, ici, via la rétine, entraîne divers traitements de bas niveaux (orientation, filtres, ...) au niveau des aires visuelles primaires, les traitements de plus haut niveau (localisation, catégorisation, ...) étant assurés au

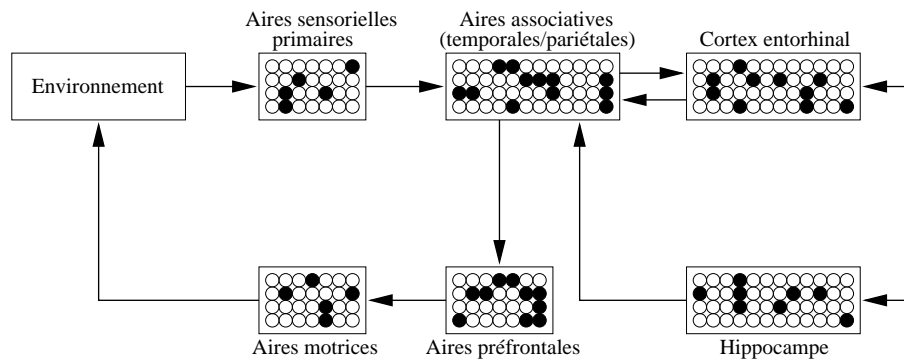


Figure 6. Le flux d'informations entre les différentes structures cérébrales est organisé selon une boucle de perception/action. Les entrées sensorielles en provenance du monde externe engendrent un éventuel traitement de la part des diverses structures qui engendreront à leur tour une action sur le monde

niveau des aires associatives pariétales et temporales. Ces aires étant projetées dans le cortex entorhinal, la structure hippocampique est en mesure de confronter le motif actuel à ce qu'il a mémorisé auparavant, permettant ainsi le rappel ou l'apprentissage du motif. La sélection de l'action au niveau des aires associatives et préfrontales va entraîner une action motrice à même de provoquer une nouvelle perception du monde.

4. Un modèle computationnel

Dans l'hypothèse d'un rôle générique de l'hippocampe (responsable de la mémoire déclarative dans son ensemble, sans traitement spatial explicite), la construction et l'utilisation de la carte cognitive requiert au minimum la coopération d'autres structures. Notre hypothèse est donc que la carte cognitive est distribuée entre l'hippocampe et le cortex : l'hippocampe permet de mémoriser rapidement et explicitement différents états perceptifs multimodaux en provenance du cortex et ce dernier mémorise la façon de passer d'un état perceptif à un autre. Dans le cadre d'une tâche de navigation, cela induit la construction implicite d'une carte topologique. De plus, si l'on admet que les traitements spatiaux sont réalisés en amont de l'hippocampe, alors la vue d'un hippocampe générique responsable de la mémoire déclarative est cohérente avec le phénomène des cellules de lieux telles qu'observées au sein de l'hippocampe des rongeurs : Le fait que le cortex entorhinal soit connecté à l'ensemble du cortex autorise *de facto* la présence de telles cellules au sein de l'hippocampe.

4.1. Une tâche simple

Un animat est placé dans un monde discrétisé où chaque lieu est caractérisé par un ensemble de 4 formes de couleurs différentes. L'animat peut se mouvoir grâce à des séquences motrices représentant des mouvements de direction absolue (ce qui revient à utiliser un compas). L'hypothèse est faite que le monde est statique dans le sens où la perception du monde externe demeure inchangée tant qu'aucune action motrice n'est effectuée par le robot. Durant la phase d'exploration, le robot est contrôlé et guidé à travers la labyrinthe afin qu'il puisse construire une carte cognitive (apprendre les transitions entre les différents lieux). Ensuite, des lieux à rallier sont désignés et il est attendu que l'animat emprunte un chemin non-aléatoire pour rallier ces buts.

4.2. De l'utilisation d'une carte topologique

Comme il a été précisé précédemment (cf. fig. 1), la carte topologique est constituée de noeuds et de liens entre ces noeuds. Lorsque la sélection du lieu à atteindre est terminée, il est important de savoir comment rejoindre ce lieu précis à l'aide de la carte topologique (cf. fig. 7). Or, les propriétés de diffusion d'appel des colonnes corticales semblent tout à fait adéquates pour résoudre ce problème.

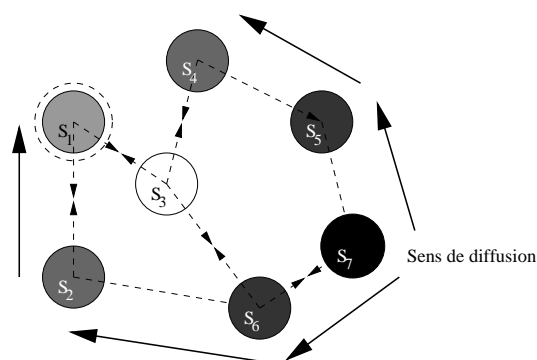


Figure 7. Exemple de diffusion d'appel dans un graphe : L'animat se trouve dans le lieu S_1 et choisit de rallier le lieu S_7 . Pour trouver le chemin correspondant, il suffit de diffuser à partir de S_7 une variable réelle dont la valeur décroît strictement de noeud en noeud. Lorsque la diffusion de la variable atteint le lieu de départ, il suffit de remonter son gradient. Cet algorithme (algorithme des flots ou de Bellman), assure de trouver le plus court chemin au sens topologique entre deux noeuds quelconques (si et seulement si un tel chemin existe). Ici, le chemin $S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_6 \rightarrow S_7$ sera utilisé

En effet, si l'on suppose qu'il existe des unités corticales reliées entre elles et décrivant la topologie du monde, il suffit de choisir quel lieu atteindre (i.e. vers quels

groupes de colonnes on doit initier l'appel) et de laisser l'appel se propager vers la "description corticale" du lieu courant. Lorsque l'appel atteindra ce groupe, un mouvement pourra être initié pour rejoindre le lieu voisin. Ainsi, de proche en proche, il est possible de rejoindre n'importe quel lieu de l'environnement.

4.3. Construction d'une carte topologique

La construction d'une carte topologique de l'environnement peut se décomposer en deux sous-tâches :

- mémorisation des différents lieux, correspondant aux noeuds du graphe
- mémorisation des différents chemins, correspondants aux liens du graphe

Ces deux sous-tâches sont tout à fait distinctes de par la nature même des informations qu'elles manipulent. En effet, dans l'hypothèse où l'on écarte la composante temporelle inhérente à l'exploration visuelle d'une scène, un lieu peut être caractérisé à tout moment par l'activité corticale résultant des divers traitements effectués sur les entrées sensorielles courantes, i.e. un lieu au sens de la carte topologique possède un ancrage dans la réalité physique et peut donc être mémorisé à tout instant. Or, un chemin au sens de la carte topologique ne représente qu'une transition dans la réalité physique, il n'y possède pas d'ancrage comparable aux lieux et ne peut être directement appréhendé. Ainsi, lors d'un déplacement d'un lieu *A* à un lieu *B*, la transition menant du lieu *A* au lieu *B* ne peut être perçue que lorsque l'on se trouve dans le lieu *B*, instant auquel le lieu *A* d'où l'on vient n'est plus directement perçu.

4.4. Rôle de l'hippocampe

Dans l'hypothèse d'un modèle d'hippocampe générique, celui-ci doit pouvoir mémoriser des configurations corticales quelconques issues du cortex entorhinal (et donc de mémoriser les lieux), les divers traitements spatiaux sur l'image rétinienne étant exécutés en amont. De plus, ce modèle d'hippocampe doit mémoriser ces configurations avec une certaine latitude afin d'éviter un phénomène de sur-apprentissage (cf. fig. 8).

Cependant, dans le cadre de la tâche simple décrite auparavant, il n'est pas nécessaire de disposer d'un modèle complexe de l'hippocampe. En effet, la mémorisation des lieux, si elle est nécessaire, peut être approximée par une simple émulation des propriétés de l'hippocampe, il suffit d'assurer une non-ambiguïté des perceptions à tout moment.

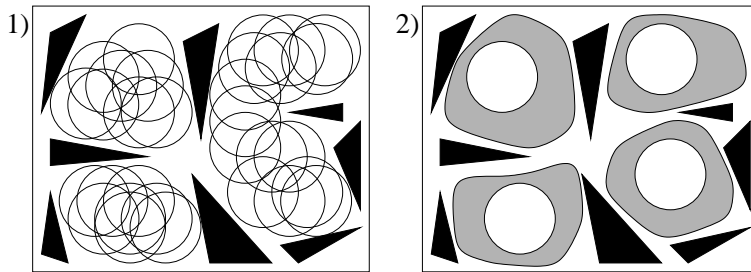


Figure 8. 1) Sans la présence d'un système adhoc autorisant la mémorisation de configurations corticales, il y aurait un phénomène de sur-apprentissage : un grand nombre de lieux, topologiquement équivalents, seraient mémorisés, entraînant éventuellement une dégradation brutale du système. 2) Le modèle d'hippocampe permet d'introduire une tolérance quant à la reconnaissance et autorise ainsi un apprentissage d'un nombre restreint de configurations corticales correspondants aux lieux. Il permet d'exhiber un prototype pour une zone physique de l'environnement

4.5. Un modèle de cortex pour mémoriser et utiliser les chemins

Comme il a été décrit précédemment, la mémorisation des chemins requiert un mécanisme différent de celui évoqué pour la mémorisation des lieux. Nous proposons donc ici un mécanisme à base de colonnes corticales à même de détecter ces transitions (cf. fig. 9).

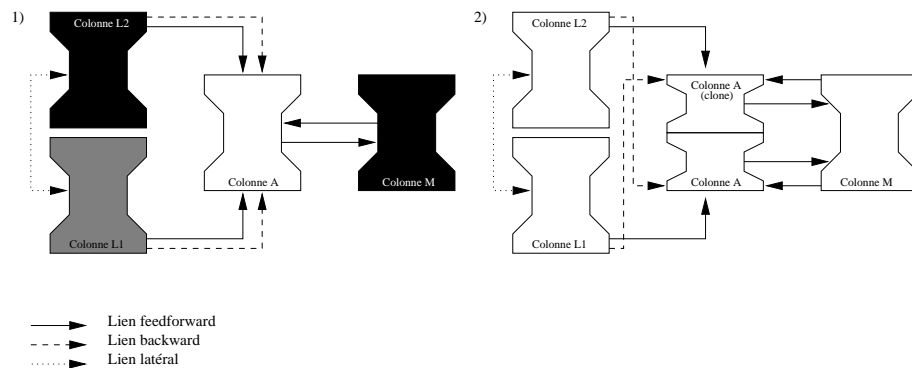


Figure 9. 1) Le passage de l'état L1 (détecté par la colonne L1) à l'état L2 (détecté par la colonne L2) est provoqué par l'action M (détecté par la colonne M). Les liens de la colonne associative A lui permettent donc de détecter cette configuration d'excitation. 2) L'apprentissage par la colonne A va provoquer sa division avec une spécialisation de la colonne clonée sur la configuration (L1, M) \rightarrow L2. Les liens concernés par la séquence seront inhibés au niveau de la colonne mère

La propriété de division des colonnes autorise une spécialisation rapide de ces dernières. En effet, si l'on suppose qu'il existe une aire associative mettant en relation les aires pariétales de traitement de l'information spatiale aux aires motrices, alors les colonnes de cette aire associative sont en mesure de détecter les séquences du type : si l'on perçoit l'événement perceptif 1 et que l'on exécute le mouvement M alors on percevra l'événement perceptif 2. Ce séquençage d'événements, dans le contexte de la navigation, va permettre la construction effective d'une carte topologique. Toutefois, il faut préciser que ce séquençage ne donnera une description valable du monde que dans l'hypothèse où celui-ci est statique, c'est à dire que la perception du monde ne change que suite à une action motrice du système.

4.6. Mise en oeuvre du modèle cortical

La mise en oeuvre du modèle complet n'étant pas encore opérationnelle sur des entrées sensorielles réelles, seul le modèle cortical de construction et d'utilisation de la carte cognitive sera présenté ici en détail (il existe néanmoins implicitement un modèle simplifié de l'hippocampe nous assurant la mémorisation des lieux).

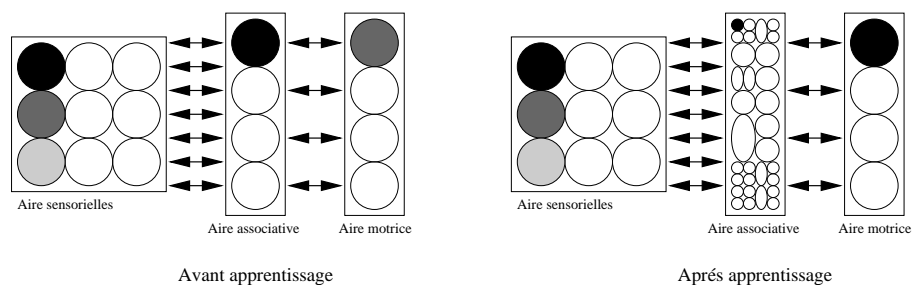


Figure 10. *Modèle simplifié.* On suppose que les aires sensorielles sont capables de détecter les différents états perceptifs du système (position du point de focalisation) sans ambiguïté. Les unités de l'aire associative, par leur divisions successives, vont permettre la construction de la carte topologique

Le principe de construction de la carte topologique repose entièrement sur le mécanisme de division des colonnes évoqué auparavant. Ainsi, lorsque le point de focalisation se trouve au lieu $L1$ et que l'action motrice *aller à gauche* est exécutée, le point de focalisation se trouve alors au lieu $L2$. Or, l'aire sensorielle étant entièrement connectée à l'aire associative (cf. fig. 10), il existe une colonne de l'aire associative à même de détecter cette séquence d'événements. Cette colonne va donc se diviser afin que la colonne clonée se spécialise sur cette séquence précise. Les liens concernés seront inhibés au niveau de la colonne mère, empêchant ainsi une division *ad vitam eternam* de celle-ci vis-à-vis de cette séquence précise.

Durant la phase d'apprentissage, le point de focalisation est donc contrôlé de façon à parcourir l'ensemble des chemins existants (de façon bidirectionnelle). Dès que tous les chemins ont été parcourus, la carte topologique correspondante est donc construite au sein du modèle de cortex.

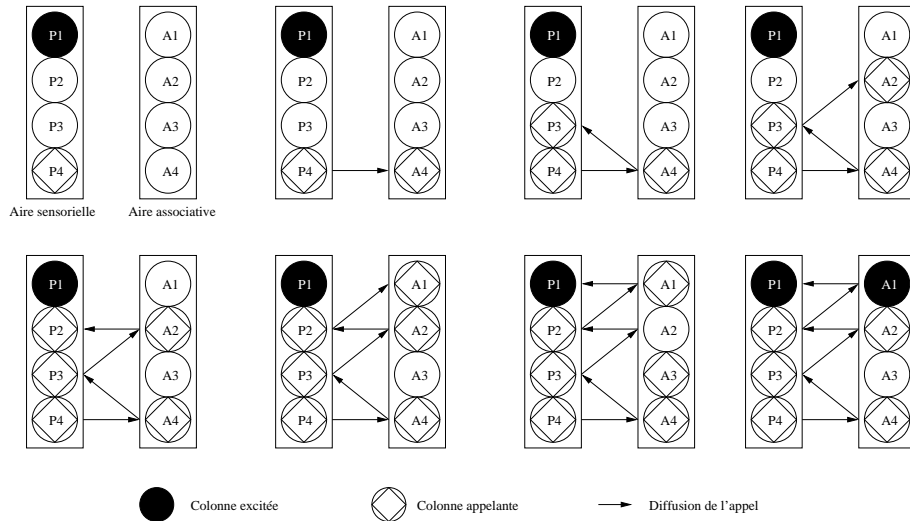


Figure 11. Dans cet exemple, l'animat se trouve dans l'état représenté par la colonne P1 et l'état P4 est souhaité. Une activité d'appel est donc initiée au niveau de la colonne P4. Lorsque l'apprentissage a été effectué, les propriétés de diffusion d'appel des colonnes corticales vont transmettre l'appel jusqu'à la colonne A1. Cette colonne reçoit donc une activité d'excitation de la part de P1 et une activité d'appel de la part de P2, ce qui est suffisant pour déclencher son excitation et induire le mouvement moteur correspondant, permettant donc de rejoindre l'état P2. Ainsi, de proche en proche, l'état P4 pourra être atteint

La phase d'utilisation requiert qu'une perception, correspondant à une place, soit "demandée", i.e. la colonne correspondante doit être dans l'état appelant (cf. fig. 11). Cet état d'appel ne suffisant pas à exciter la colonne, l'appel est propagé vers l'ensemble des colonnes voisines. L'appel est donc propagé jusqu'à ce qu'il atteigne la colonne associative reliant l'état perceptif courant à un autre état. L'excitation de la colonne représentant l'état perceptif courant et l'état d'appel de la colonne associative vont suffire à exciter cette dernière, déclenchant ainsi le mouvement moteur associé autorisant alors le système à passer dans l'état perceptif voisin. De proche en proche, l'état souhaité pourra ainsi être atteint (à condition qu'un tel chemin existe).

5. Conclusion

La tâche simple présentée auparavant montre donc comment il est possible de construire une carte topologique distribuée entre l'hippocampe et le cortex. L'hippocampe est nécessaire car lui seul est en mesure de mémoriser des motifs corticaux multimodaux (équivalents à des lieux) alors que le cortex permet de construire et d'utiliser les chemins entre ces différents lieux. La carte cognitive ne se trouve pas exclusivement dans l'une ou l'autre structure, elle est construite et utilisée par interaction entre ces deux structures. Et s'il existe aujourd'hui nombre de modèles à même de rendre compte de la navigation autonome à l'aide d'une carte topologique, le modèle présente l'intérêt d'étendre la localisation de la carte cognitive dans le cortex en permettant ainsi une manipulation directe par les aptitudes procédurales de ce dernier. En effet, les travaux de [FRE 99] ont montré comment il était possible à partir de ce même modèle de colonne corticale de réaliser des tâches de sélection de l'action (dans le cas d'un animat doté de besoins vitaux tels que faim et soif). La cohérence des deux modèles autorise donc une unification permettant de sélectionner le but à atteindre et de faire coopérer les deux systèmes [ROU 99]. Les perspectives de développement concernent donc principalement la poursuite du modèle avec notamment l'intégration effective du modèle d'hippocampe vis à vis de données réelles, l'unification avec le modèle du cortex associatif et l'implantation sur un robot réel (Koala) afin de tester la robustesse.

Bibliographie

- [ARB 77] M. A. ARBIB ET I. LIEBLICH. Motivational learning of spatial behavior. *Systems Neuroscience*, pages 221–239, 1977.
- [BEN 96] A. T. BENNETT. Do animals have cognitive maps? *The Journal of Experimental Biology*, 199 :219–224, 1996.
- [BUR 89] Y. BURNOD. *An adaptive neural network the cerebral cortex*. Masson, 1989.
- [FRE 98] H. FREZZA-BUET ET ALEXANDRE F. Selection of action with a cortically-inspired model. In *Seventh European Workshop on Learning Robots*, pages 13–21, 1998.
- [FRE 99] H. FREZZA-BUET ET F. ALEXANDRE. Specialization within cortical models : An application to causality learning. *7th European Symposium on Artificial Neural Networks*, 1999. To appear.
- [GAU 99] P. GAUSSIER, C. JOULAIN, J. P. BANQUET, S. LEPÊTRE ET A. REVEL. The visual homing problem : an example of robotics/biology cross fertilization. In *Robotics and Autonomous Systems*, 1999.
- [MAR 71] D. MARR. Simple memory : A theory of archicortex. In *The Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, number 262 in B, pages 23–81, 1971.
- [MAR 98] R. MARTIN. *Encodage Spatial et Intelligence*. PhD thesis, Université Nancy 2, Département Psychologie, 1998.
- [MCC 94] J. L. MCCLELLAND, B. L. MCNAUGHTON ET R. C. O'REILLY. Why there are complementary learning systems in the hippocampus and neocortex : Insights from

the successes and failures of connectionist models of learning and memory. Technical report, Carnegie Mellon University and The University of Arizona, March 1994.

- [MCN 90] B. L. MCNAUGHTON ET L. NADEL. *Neuroscience and connectionist theory*, chapter 1 : Hebb-Marr networks and the neurobiological representation of action in space, pages 1–63. M. Gluck and Rumelhart, Hillsdale, Erlbaum edition, 1990.
- [MIL 89] P. MILNER. A cell assembly theory of hippocampal amnesia. *Neuropsychologia*, pages 23–30, 1989.
- [MUR 96] J. MURRE. *Hippocampus*, volume 6, chapter 6, TraceLink : A model of Amnesia and Consolidation of Memory, pages 675–684. David G. Amaral and Menno P. Witter, 1996.
- [O’K 71] J. O’KEEFE ET J. DOSTROVSKY. The hippocampus as a spatial map : preliminary evidence from unit activity in the freely moving rat. *Brain Res*, 34 :171–175, 1971.
- [O’K 78] J. O’KEEFE ET L. NADEL. *The hippocampus as a cognitive map*. Oxford University Press, 1978.
- [O’R 99] R. O’REILLY ET J. W. RUDY. Conjunctive representations in learning and memory : principles of cortical and hippocampal function. Technical report, Department of Psychology, University of Colorado, 1999.
- [RED 97] D. A. REDISH. *Beyond the Cognitive Map : contributions to a computational Neuroscience Theory of Rodent Navigation*. PhD thesis, Computer Science Department and Center for the neural Basis Cognition, Carnegie Mellon University, 1997.
- [ROL 96] E. T. ROLLS. *Hippocampus*, volume 6, chapter 6, A Theory of Hippocampal Function in Memory, pages 601–620. David G. Amaral and Menno P. Witter, 1996.
- [ROU 99] N. ROUGIER, H. FREZZA-BUET ET F. ALEXANDRE. Neuronal mechanisms for sequence learning in behavioral modeling. In C. L. GILES ET R. SUN, eds, *Neural, Symbolic, and Reinforcement Methods for Sequence Learning Workshop, Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 35–40. IJCAI, August 1999.
- [SCH 97] N. A. SCHMAJUK. *Animal Learning and Cognition*. Cambridge University Press, 1997.
- [SQU 92] L. R. SQUIRE. Memory and the hippocampus : A synthesis from findings with rats, monkeys and humans. *Psychological Review*, 99(2) :195–231, 1992.
- [TOL 48] E. C. TOLMAN. Cognitive maps in rats and men. *Psychological review*, 55 :189–208, 1948.
- [TRU 97a] O. TRULLIER, S. I. WIENER, A. BERTHOZ ET J. A. MEYER. Biologically based artificial navigation systems : review and prospects. *Progress in Neurobiology*, 51 :483–544, 1997.
- [TRU 97b] O. TRULLIER ET J. A. MEYER. Place sequence learning for navigation. In *Proceedings of ICANN’97*, pages 757–762, 1997.

