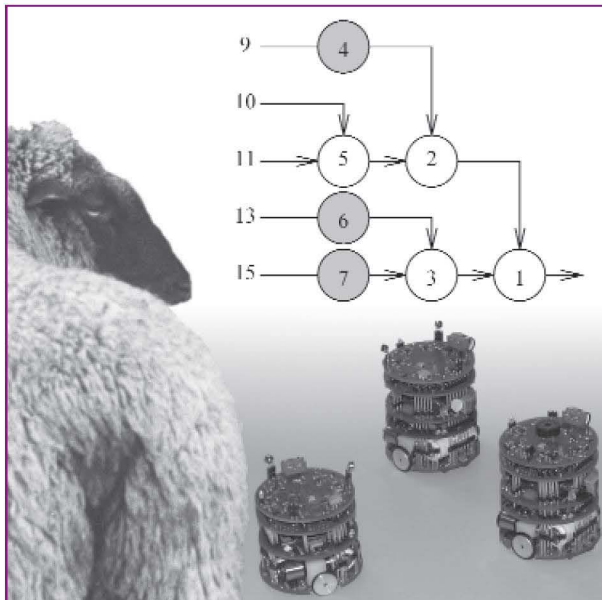


Des moutons et des robots

ARCHITECTURE DE CONTRÔLE RÉACTIVE
ET DÉPLACEMENTS COLLECTIFS DE ROBOTS

Pierre Arnaud



Des moutons et des robots

ARCHITECTURE DE CONTRÔLE RÉACTIVE
ET DÉPLACEMENTS COLLECTIFS DE ROBOTS

COLLECTION META

Des moutons et des robots

ARCHITECTURE DE CONTRÔLE RÉACTIVE
ET DÉPLACEMENTS COLLECTIFS DE ROBOTS

Pierre Arnaud

PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES

La Collection **META**

Le préfixe «meta», d'origine grecque, caractérise une classe de mots qui ont en commun le concept de dépassement: métaphysique, métalangage, métamathématiques, métamorphose...

Au-delà du réel apparent et de la routine, nous éprouvons parfois le sentiment de comprendre l'essence même d'un problème. En somme, toute recherche scientifique bien comprise consiste à dépasser les perceptions naïves de la réalité et à arracher les voiles successifs qui dérobent celle-ci à notre compréhension.

A ce titre, il y a des travaux de recherche qui créent des percées à travers lesquelles tout un mouvement scientifique se développe.

L'ambition de la collection META est de publier des monographies permettant des avancées de ce type, soit que l'auteur ait réalisé lui-même un travail de pointe, soit qu'il ait opéré une synthèse de l'état de l'art.

Dans la même collection:

Structures de documents et lecture optique: une nouvelle approche (1990)

Rolf Ingold

Les accepteurs (1993)

Marc Dikötter

Livres électroniques (1995)

Jacques Pasquier et Jacques Monnard

Dynamics and Self-organization of Locally Coupled Neural Networks (1997)

Patrick Thiran

Neuro-Fuzzy Controllers (1997)

Jelena Godjevac

Les Presses polytechniques et universitaires romandes sont une fondation scientifique dont le but est principalement la diffusion des travaux de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, d'autres universités francophones ainsi que des écoles techniques supérieures. Le catalogue de leurs publications peut être obtenu par courrier aux presses polytechniques et universitaires romandes, EPFL – Centre Midi, CH-1015 Lausanne, par E-mail à ppur@epfl.ch, par téléphone au (0)21 693 41 40, ou par fax au (0)21 693 40 27.

Vous pouvez consulter notre catalogue général sur notre serveur Internet:

<http://www.ppur.org>

Première édition

ISBN 2-88074-458-X

Imprimé en Suisse par Schüler SA, Bienne

© 2000, Presses polytechniques et universitaires romandes,

CH-1015 Lausanne

Tous droits réservés.

Reproduction, même partielle, sous quelque forme ou sur quelque support que ce soit, interdite sans l'accord écrit de l'éditeur.



Table des matières

Introduction	1
1 L'intelligence	3
1.1 L'intelligence humaine	3
1.1.1 Théories sur l'intelligence humaine	4
1.1.2 L'esprit et l'intelligence	5
1.1.3 Le cerveau	6
1.2 L'intelligence chez l'animal	7
1.3 L'apprentissage chez l'animal	8
1.4 L'intelligence artificielle	9
1.4.1 Les précurseurs de l'intelligence artificielle	9
1.4.2 Les premiers calculateurs électroniques	10
1.4.3 Les automates finis et les automates cellulaires	10
1.4.4 L'intelligence artificielle classique	11
1.4.5 Quand une machine est-elle intelligente ?	13
1.4.6 Réseaux de neurones artificiels	14
1.4.7 Un esprit « humain » dans un ordinateur ?	16
1.4.8 Cerveau artificiel	17
1.5 Synthèse	17
2 Les robots	19
2.1 Mythologie et légendes	19
2.2 Robots et science-fiction	20
2.3 Automates mécaniques	21
2.4 Autorégulation et rétroaction	22
2.5 Cybernétique	23
2.6 Robots industriels	25
2.7 Véhicules autoguidés	25
2.8 <i>Machina speculatrix</i>	26
2.9 Robotique et intelligence artificielle classique	28
2.10 Robotique et nouvelles approches	29
2.11 La représentation	30
2.12 Immersion et incarnation	32
2.13 Systèmes réactifs, perception guidée par l'action	33
2.14 Autonomie	34
2.15 Comportements émergents	35
2.16 Robotique collective	36
2.17 Efficacité de groupe	37
2.18 Intelligence collective	38
2.19 Synthèse	39

3	Déplacements collectifs	41
3.1	Groupes d'animaux.....	41
3.2	Structure des groupes, taxonomie	43
3.3	Déplacement collectif de robots mobiles	46
3.3.1	Travaux de Maja Mataric	47
3.3.2	Travaux de Lynn Parker.....	49
3.3.3	Travaux de Balch et Arkin	50
3.3.4	Autres travaux	51
3.3.5	Utilité du déplacement collectif	51
4	Navigation et capteurs.....	53
4.1	Introduction.....	53
4.2	Importance des capteurs	53
4.3	Mesure de distance et détection d'obstacles.....	54
4.3.1	Détection par contact direct avec interrupteur	54
4.3.2	Détection par contact direct avec pare-chocs	54
4.3.3	Détection par contact direct avec moustaches	54
4.3.4	Détection de proximité photoélectrique.....	55
4.3.5	Détection de proximité capacitive ou inductive	55
4.3.6	Mesure de distance photoélectrique par triangulation.....	56
4.3.7	Mesure de distance photoélectrique passive.....	56
4.3.8	Mesure de distance photoélectrique par mesure de phase	56
4.3.9	Mesure de distance par vision stéréoscopique	57
4.3.10	Mesure de distance par analyse du flux optique.....	57
4.3.11	Mesure de distance par sonar ou écholocalisation.....	58
4.4	Mesure de position et de déplacement.....	59
4.4.1	Système de positionnement global GPS.....	59
4.4.2	Localisation par amers.....	60
4.4.3	Odométrie.....	61
4.4.4	Clinomètre	63
4.4.5	Boussole	63
4.4.6	Orientation par mesure du gradient.....	64
4.4.7	Guidage inertiel	65
4.5	Mesure proprioceptive	65
5	Localisation des membres du groupe.....	67
5.1	Introduction.....	67
5.2	Diffusion d'information par balise active	68
5.3	Choix du type de balise active.....	71
5.4	Communication par émissions sonores	72
5.4.1	Mesure de la direction	73
5.4.2	Mesure de distance.....	73
5.4.3	Configuration retenue.....	75
6	Architecture à fusion d'actions généralisée	77
6.1	Architecture à subsomption.....	77

6.1.1	Présentation générale	77
6.1.2	Principes	80
6.1.3	Structure de base.....	81
6.1.4	Coordination par subsomption.....	83
6.1.5	Commentaires	85
6.1.6	Avantages et inconvénients.....	87
6.1.7	Synthèse.....	88
6.2	Architecture à sélection d'actions.....	88
6.2.1	Présentation générale	88
6.2.2	Structure et fonctionnement.....	89
6.2.3	Coordination.....	90
6.2.4	Avantages et inconvénients.....	90
6.2.5	Sélection d'actions simplifiée	91
6.3	Architecture orientée schémas	91
6.3.1	Les schémas	92
6.3.2	Activité	93
6.3.3	Evidences biologiques.....	93
6.3.4	Les champs de potentiel.....	94
6.3.5	Coordination.....	95
6.3.6	Avantages et inconvénients.....	96
6.4	Unification des architectures.....	97
6.4.1	Conventions.....	97
6.4.2	Notations	98
6.4.2.1	Le vecteur réponse.....	99
6.4.2.2	L'activité	100
6.4.3	Coordination par réseau de nœuds.....	101
6.4.3.1	Nœud inhibiteur	103
6.4.3.2	Nœud supprimeur	103
6.4.3.3	Nœud d'augmentation.....	104
6.4.3.4	Nœud de sélection du maximum	106
6.4.4	Généralisation des nœuds	106
6.4.4.1	Le réseau de nœuds	107
6.4.4.2	Nœud fictif.....	109
6.4.5	Nœuds conjugués	109
6.4.5.1	Nœud inhibiteur conjugué	110
6.4.5.2	Nœud supprimeur conjugué.....	111
6.5	Architecture à fusion d'actions généralisée	112
6.6	Synthèse.....	113
7	Architecture appliquée	115
7.1	Exemple d'application.....	115
7.1.1	Robot simulé.....	115
7.1.2	Comportements élémentaires	115
7.1.3	Construction de l'architecture de contrôle.....	116
7.1.4	Variante	117
7.1.5	Simulation	118

7.2	Comparaison avec l'architecture à subsomption.....	121
7.3	Comparaison avec l'architecture orientée schémas	123
7.4	Analyse des résultats	124
7.5	Déplacements collectifs simulés.....	125
7.5.1	Troupeau.....	125
7.5.2	Procession	127
7.5.3	Formation	127
7.5.4	Front	130
7.5.5	Autres types de déplacements.....	130
7.6	Perspectives.....	131
7.6.1	Extension à des activités vectorielles.....	131
7.6.2	Superposition d'états	133
7.7	Synthèse	134
8	Le robot Khepera	135
8.1	Présentation du robot	135
8.1.1	Architecture matérielle	135
8.1.2	Architecture logicielle.....	136
8.1.3	Avantages et inconvénients	137
8.2	Environnement de développement	138
8.3	Tourelles additionnelles	139
8.4	Programmation du DSP	141
8.4.1	Communication avec la tourelle DSP.....	142
8.4.2	Communication avec la tourelle d'acquisition	143
8.4.3	Algorithme	144
8.4.4	Résultats.....	146
9	Expériences	149
9.1	Présentation générale.....	149
9.2	Architecture logicielle.....	149
9.2.1	Consignes.....	150
9.2.2	Construction des couches.....	151
9.3	Architecture matérielle et « métarobot ».....	152
9.4	Expériences avec un seul robot	154
9.4.1	Homing	154
9.4.2	Escaping.....	155
9.4.3	Following.....	155
9.5	Expériences avec un seul robot et obstacle.....	156
9.6	Expériences avec plusieurs robots	157
9.6.1	Following.....	158
9.7	Résultats.....	162
9.7.1	Déplacement collectif.....	162
9.7.2	Problèmes et solutions	162
9.8	Synthèse	164
10	Bibliographie.....	165

Remerciements

Cet ouvrage n'aurait probablement jamais vu le jour sans la rencontre fortuite, le long d'un bisse valaisan, d'une colonne compacte de plusieurs centaines de chenilles poilues... Ces infatigables processionnaires du pin m'ont donné envie de mieux comprendre les mécanismes conduisant à la formation de groupes d'animaux, pour être en mesure de les appliquer à des robots.

Mes recherches ont débouché sur une thèse de doctorat intitulée « Architecture de contrôle réactive et déplacements collectifs de robots » soutenue en mai 1999 au Département d'informatique de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), et récompensée en décembre de la même année par un prix rédactionnel de la « Société Université et Recherche » (SUR).

Je voudrais remercier ici mon directeur de thèse et ami, le Professeur Jean-Daniel Nicoud du Laboratoire de micro-informatique¹ (LAMI), qui m'a encouragé tout au long de mon travail et poussé à éditer cet ouvrage.

J'aimerais remercier également Sylvie, Cathi, Marie-Jo et mes proches de leur soutien et de leurs conseils.

Enfin, merci au génial Khepera, petit robot mobile aux ressources souvent insoupçonnées...

¹ Le LAMI a malheureusement fermé ses portes le 31 août 2000, en raison du départ du Professeur Nicoud.

Introduction

Les premiers travaux de recherche mettant en œuvre des robots mobiles remontent au début des années 1970. Les robots utilisés alors étaient des colosses maladroits que nous comparerions aujourd'hui à des robots autistes. Bien que munis d'un grand nombre de capteurs, ils n'étaient capables d'interagir avec leur environnement que dans des limites très restreintes. Leur maladresse pathologique résultait du système de contrôle utilisé.

En effet, pour appréhender leur environnement et décider des actions à accomplir, leur contrôleur s'appuyait sur un modèle de planification des actions dérivé directement de l'intelligence artificielle classique. L'information fournie par les capteurs devait d'abord être convertie en symboles (CHAISE-A-DROITE, MUR-DEVANT, SOL-INCLINE) pour permettre une mise à jour de la représentation interne du monde. La planification pouvait ensuite s'opérer sur ce modèle abstrait pour aboutir à des actions (TOURNER-A-GAUCHE, S'ARRETER, FREINER) qu'il fallait encore convertir en commandes motrices.

Malgré l'utilisation d'ordinateurs de plus en plus puissants, il n'était pas possible à ces robots de rivaliser avec le plus simple des insectes dès qu'il s'agissait d'interagir avec un environnement réel, dynamique et partiellement imprévisible. Et pourtant les insectes se contentent de réagir aux stimuli qu'ils perçoivent.

La représentation symbolique devait donc être abandonnée au profit de systèmes beaucoup plus simples, agissant selon un modèle perception-action. C'est dans cette optique que des architectures de contrôle réactives ont été développées. Grâce à elles, les informations en provenance des capteurs sont traitées directement par des modules comportementaux qui implémentent les comportements de base (*basic behaviours*); ceux-ci enfin génèrent les consignes pour les actionneurs. La robotique réactive était née... Cette nouvelle discipline, parfois plus proche de la vie artificielle que de l'intelligence artificielle, a donné le jour à son tour à la robotique collective.

C'est dans ce cadre que s'inscrit cet ouvrage, présentant, en particulier, une nouvelle architecture de contrôle réactive : *l'architecture à fusion d'actions généralisée*. Cette dernière réunit les points forts des principales architectures réactives utilisées actuellement en robotique mobile, à savoir la subsomption, les schémas moteurs et la sélection d'actions.

L'architecture à fusion d'actions gère la coordination et la coopération des divers modules comportementaux au moyen d'un réseau de nœuds organisé en arbre binaire. Chaque nœud y opère la combinaison de deux consignes comportementales, ce qui peut se traduire globalement par une fusion d'actions.

Cette architecture a été d'abord vérifiée au moyen de simulations, puis par plusieurs séries d'expériences sur le déplacement collectif de robots mobiles Khepera, mettant notamment en œuvre un mécanisme de communication par voie sonore.

Cet ouvrage ne se borne pas à présenter cette architecture et les expériences conduites en laboratoire avec le robot Khepera. Il retrace d'abord l'évolution de notions fondamentales comme celles d'intelligence (humaine et artificielle), s'efforce de situer ensuite avec précision la démarche de la robotique collective dans son contexte historique et présente aussi les divers déplacements qu'effectue tel ou tel groupe d'animaux et dont s'inspirent les chercheurs en robotique collective. Dans ce cadre enfin, cet ouvrage fait la synthèse des différents travaux antérieurs et s'intéresse en détail aux systèmes de navigation et de localisation ainsi qu'à leurs implications techniques.

Ainsi, par son approche à la fois large et complète, cet ouvrage apporte des données de référence pouvant tout aussi bien être utiles à un informaticien, à un roboticien ou à un dilettante amateur de technique.

1 L'intelligence

Intelligence *n. f.* (XII^e; lat. *intelligentia*, var. de *intellegentia*, de *intellegere* « comprendre »).

1• (1160). Faculté de connaître, de comprendre.

2• (*Sens strict*). L'ensemble des fonctions mentales ayant pour objet la connaissance conceptuelle et rationnelle (opposé à *sensation* et à *intuition*).

3• (1636). *Didact.* Aptitude (d'un être vivant) à s'adapter à des situations nouvelles, à découvrir des solutions aux difficultés qu'il rencontre.

4• *Cour.* Qualité de l'esprit qui comprend et s'adapte facilement; caractère d'une personne intelligente [...]

[Robert 1996]

L'*intelligence* est un concept difficile à définir — contrairement à l'idée que le lecteur peut se faire en consultant un dictionnaire — car il est impossible d'en donner une définition unique et universelle qui satisfasse toutes les personnes qui s'y intéressent. Comme nous allons le voir dans ce chapitre, les avis des experts divergent.

1.1 L'intelligence humaine

Qu'est-ce que l'intelligence humaine ?

Interrogés en 1921 sur ce sujet, les experts dans le domaine de l'intelligence ont donné les définitions suivantes [Sternberg *et al* 1986] :

- La capacité de donner de bonnes réponses du point de vue de la vérité ou des faits (E. L. Thorndike).
- L'aptitude à mener une pensée abstraite (L. M. Terman).
- Avoir appris ou avoir l'aptitude à apprendre à s'adapter à l'environnement (S. S. Colvin).
- L'aptitude à s'adapter de manière adéquate à des situations relativement nouvelles (R. Pinter).
- La capacité de connaître et la connaissance acquise (V. A. C. Henmon).
- Un mécanisme biologique permettant aux effets de plusieurs stimuli complexes d'être rassemblés et de produire un résultat plus ou moins unifié dans le comportement (J. Peterson).
- La capacité à inhiber une adaptation instinctive, la capacité à redéfinir l'adaptation instinctive inhibée à la lumière d'essais et d'erreurs imaginaires, et la capacité de la volonté à mettre en application l'adaptation instinctive modifiée dans le

comportement pour le bénéfice de l'individu en tant qu'animal social (L. L. Thurstone).

- La capacité à acquérir des capacités (H. Woodrow).
- La capacité à apprendre ou à profiter de l'expérience (W. F. Dearborn).

Ajoutons à cette liste la définition donnée en 1882 par G. J. Romanes, l'un des premiers psychologues comparatifs : il définit l'intelligence comme la capacité pour un individu d'ajuster son comportement en fonction des conditions changeantes de l'environnement.

Ces définitions paraissent toutes différentes de prime abord, mais nous pouvons en dégager le thème principal, à savoir la capacité d'apprendre à partir d'expériences passées et de s'adapter à l'environnement.

L'intelligence semble donc être une *capacité générale d'adaptation à des problèmes nouveaux et des conditions de vie nouvelles* [Sternberg 1993].

1.1.1 Théories sur l'intelligence humaine

De nombreux tests furent développés pendant la première moitié du XX^e siècle afin de mesurer, de quantifier ou d'identifier les divers composants de l'intelligence. Les résultats de ces tests donnèrent lieu à de multiples interprétations.

Ainsi, Edwin Boring (1923) définit l'intelligence comme tout ce que mesurent ces tests. Cette définition n'est cependant pas réellement satisfaisante, dans le sens où les réponses qu'elle apporte dépendent fortement des tests effectués. Il rejoint ainsi le point de vue du Français Alfred Binet – inventeur du test d'aptitude et de l'échelle métrique du développement mental – qui à la question « Qu'est-ce que l'intelligence ? » répondit « C'est ce que mesure mon test » [Sandoz 1997].

Charles Spearman (1927) tenta de donner une meilleure définition de l'intelligence, basée sur des critères statistiques. Selon lui, l'intelligence comprend deux types de *facteurs* : un *facteur général* et des *facteurs spécifiques*. Les facteurs spécifiques déterminent une aptitude à résoudre un type de test mental particulier, alors que le facteur général correspond à une sorte d'énergie mentale.

Pour Godfrey Thompson (1939), ce facteur général n'est qu'une illusion liée au fonctionnement d'une multitude de liens mentaux comprenant les réflexes et les associations apprises entre stimuli et réponses. Ces liens sont nécessaires à toute activité intellectuelle et, en se combinant, donnent l'impression d'un facteur général.

L. L. Thurstone (1938) dressa quant à lui un catalogue des facteurs primaires, intitulé *aptitudes mentales primaires*. En font partie la compréhension verbale, la fluidité verbale, la manipulation des nombres, la visualisation dans l'espace, la vitesse perceptive, la mémoire et le raisonnement. J. P. Guilford (1967) étendit le catalogue initial de Thurstone à 120 aptitudes élémentaires.

P. E. Vernon (1971) révisa la description factorielle et proposa une description largement admise aujourd'hui, la *description hiérarchisée de l'intelligence*. Selon lui, l'intelligence peut être décrite par différents niveaux d'aptitudes. Au niveau

supérieur se trouve le facteur général identifié par Spearman, puis les facteurs du *groupe majeur* (capacité verbale-éducationnelle, capacité pratique-mécanique), ensuite les facteurs du *groupe mineur* (subdivision des facteurs du groupe majeur) et enfin, au niveau inférieur, les facteurs spécifiques.

D'autres abordèrent la question sous l'angle du traitement de l'information (Caroll, 1976; Hunt *et al*, 1973; Newell et Simon, 1972; Sternberg 1979). Ils tentèrent de comprendre l'intelligence en termes de composants utilisés pour résoudre divers types de problèmes. Ils dénombrèrent cinq types de composants :

- les *métacomposants*, processus de niveau supérieur dirigeant la résolution générale d'un problème;
- les *composants de performance*, processus utilisés lors de la résolution effective d'un problème;
- les *composants d'acquisition*, processus utilisés pour l'apprentissage;
- les *composants de rétention*, processus utilisés pour retrouver des informations mémorisées;
- les *composants de transfert*, processus utilisés dans la généralisation.

La vision de l'intelligence comme traitement de l'information s'accorde avec la théorie factorielle sans toutefois apporter des réponses à toutes les questions que se posent les psychologues. Il n'est par exemple pas possible de quantifier l'intelligence indépendamment du groupe culturel auquel appartient un individu ou de prédire de manière fiable les performances d'un individu dans le monde réel.

1.1.2 L'esprit et l'intelligence

Les courants philosophiques de type mentaliste ont longtemps considéré le *cerveau* comme un détecteur au service de *l'esprit*. De nos jours, les milieux scientifiques considèrent plutôt l'esprit comme une manifestation de l'activité physique du cerveau². Les manifestations particulières de l'esprit – pensées, émotions, idées – ne peuvent cependant pas être associées à des groupes de neurones spécifiques du cerveau. Même des techniques modernes comme la tomographie par émission de positrons (TEP) et l'imagerie par résonance magnétique (IRM) ne permettent pas de *voir le cerveau penser*³ [Zarifian 1996].

L'esprit serait, selon Marvin Minsky, l'assemblage d'un très grand nombre d'éléments – les *agents de l'esprit* – bien trop petits et trop simples pour être eux-mêmes considérés comme intelligents [Minsky 1987].

² « En fait, on considère à présent l'esprit comme le produit d'un traitement actif du flux des informations par l'intermédiaire de voies élémentaires ou de réseaux complexes, qui permettent de faire ressortir les informations importantes sur la réalité, mettant en relation des unités d'information, en faisant la synthèse, et élaborant des plans et des programmes de conduite, exprimés par la parole ». [Luria 1993]

³ « Voir le cerveau penser est un mythe, ou un fantasme. [...] Les principales promesses sont dans l'analyse des fonctions cognitives ». [Zarifian 1996]

Minsky définit l'intelligence comme la capacité d'un être à résoudre des problèmes qu'il juge difficiles dans un laps de temps réduit. Il fait par ailleurs remarquer que cette capacité à résoudre des problèmes repose uniquement sur des processus de l'esprit. Le terme d'*intelligence* sert donc simplement à nommer ces processus.

1.1.3 Le cerveau

Les philosophes et les psychologues se sont longtemps intéressés au cerveau en tant que support des mécanismes intellectuels nécessaires au développement de l'intelligence et au fonctionnement de l'esprit. Leurs recherches les ont conduits à dresser un catalogue des structures du cerveau et de leurs fonctions respectives⁴.

Charles Darwin supposait vers 1850 déjà que le cerveau avait évolué comme organe de la pensée. Ce n'est qu'à partir de 1870 que les recherches anatomiques et fonctionnelles sur le cerveau et le système nerveux purent réellement débuter. C'est en effet à cette période que fut découvert un colorant permettant de mettre en évidence les cellules nerveuses dans les coupes sous microscope.

Le système nerveux permet aux animaux constitués de plus que de quelques cellules de recevoir des stimuli et de répondre à ceux-ci. Il est constitué de trois parties : les *nerfs afférents* et leurs récepteurs, les *fibres nerveuses efférentes* (rattachées aux muscles et aux glandes) et le *système nerveux central*, formé par le cerveau et la moelle épinière.

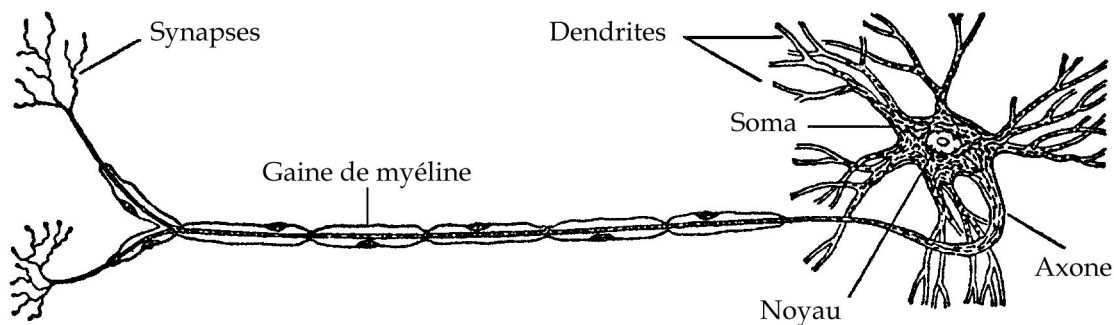


Fig. 1.1 Neurone avec corps cellulaire (soma), dendrites et axone.

Comme tout autre tissu animal, le système nerveux est constitué de cellules, appelées *neurones*⁵. Leur taille peut varier entre quelques microns et plusieurs mètres. Les neurones se divisent en trois parties :

- Le *corps cellulaire*, aussi appelé *soma*. Il est délimité par une membrane cellulaire et contient le cytoplasme et le noyau.
- Les *dendrites*. Ces prolongements très fins du corps cellulaire acheminent l'information nerveuse en provenance des autres neurones vers le corps cellulaire.

⁴ Ces informations ont été recueillies en grande partie grâce à l'étude de lésions subies par le cerveau. Cette méthode est très ancienne, comme l'atteste un papyrus datant d'environ 3000 ans avant J.-C., lequel décrit l'emplacement de certains centres sensoriels et moteurs dans le cerveau.

⁵ Nous passons volontairement sous silence l'existence des cellules gliales. Elles jouent principalement un rôle dans la structuration du cerveau et participent activement à l'élimination des rejets cellulaires [Blayo *et al.* 1986].

- *L'axone*. Ce prolongement — plus long que les autres — véhicule l'information nerveuse depuis le corps cellulaire jusqu'à son extrémité, appelée *synapse*. Celle-ci est généralement en contact direct avec le dendrite d'un autre neurone, une glande ou un muscle. Un axone est souvent divisé à son extrémité et possède alors de nombreuses synapses en contact avec d'autres neurones.

La synapse permet d'assurer la jointure entre deux neurones et joue un rôle primordial dans la transmission et dans la modulation de l'information nerveuse. Celle-ci est de nature électrique lorsqu'elle circule dans les neurones (corps cellulaire, dendrites, axones) et de nature chimique à la jointure synaptique (axone).

1.2 L'intelligence chez l'animal

Les scientifiques ont longtemps considéré l'animal comme un être dénué d'intelligence et répondant aveuglément à son *instinct*, accordant à l'homme seul le statut d'être intelligent. Ce fut Darwin qui le premier remit en cause cette division abrupte entre homme et animal en affirmant (1871) que les *animaux possédaient une certaine capacité de raisonnement* et que *la différence d'intelligence entre l'homme et les animaux, aussi grande fut-elle, était une différence de degré et non pas de nature*⁶.

Définir dans quelle mesure un comportement animal est intelligent n'est pas toujours aisé car, comme nous allons le voir, des comportements complexes sont parfois de simples réactions automatiques à des stimuli extérieurs ou intérieurs.

La survie d'un animal dépend de la réponse qu'il donne à certaines conditions ou événements. Il doit par exemple se nourrir s'il a faim, s'abreuver s'il a soif, se défendre ou fuir s'il est menacé, se mettre à l'abri de la chaleur ou du froid si les conditions météorologiques deviennent extrêmes, se reposer s'il est fatigué ou encore se reproduire...

Certains événements peuvent avoir une valeur prédictive importante pour l'animal. En y répondant de manière adéquate, un animal peut se mettre à l'abri de désagréments ultérieurs et bénéficier au maximum de son environnement, assurant par là même la survie de son espèce. D'autres événements, au contraire, peuvent s'avérer sans intérêt pour l'animal et être ignorés.

Ces comportements, réponses aux stimuli perçus, peuvent avoir des bases génétiques (comportements innés) ou au contraire résulter de l'apprentissage (comportements acquis); ils sont alors révélateurs d'une certaine forme d'intelligence [Arbib 1989].

Les animaux exhibent parfois des comportements forts complexes qui peuvent passer pour l'expression d'une forme d'intelligence élevée. Pourtant, bon nombre de comportements complexes ne sont que l'expression de réflexes innés.

Ainsi, la faculté exceptionnelle dont disposent les pigeons à retrouver leur nichoir — laquelle met en œuvre des systèmes de navigation aussi variés que la boussole solaire, la boussole magnétique, les repères visuels et les repères olfactifs — ne repose que sur l'exécution de comportements préprogrammés, même si l'expression

⁶ Darwin cité par [Passingham 1990].