

J.-P. BENZÉCRI

Sur l'instauration d'un code : (3) psychophysiologie et structure des automates

Les cahiers de l'analyse des données, tome 20, n° 3 (1995), p. 359-372

http://www.numdam.org/item?id=CAD_1995__20_3_359_0

© Les cahiers de l'analyse des données, Dunod, 1995, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Les cahiers de l'analyse des données » implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques

<http://www.numdam.org/>

SUR L'INSTAURATION D'UN CODE: (3) PSYCHOPHYSIOLOGIE ET STRUCTURE DES AUTOMATES

[INST. CODE (3)]

J.-P. BENZÉCRI

6 Science de l'âme et du corps, et conception des machines

L'étude du psychisme relève de multiples disciplines. Définir la vie et la pensée, c'est d'abord un thème de philosophie qu'on ne doit jamais cesser de méditer: or cette méditation ne demeure vigilante que par l'étude systématique des faits les plus variés.

L'observation de la vie spirituelle, affective, sociale, occupe les moralistes, les psychiatres; et aussi les dramaturges, les romanciers. La psychologie expérimentale va de l'étude de l'intelligence qui résoud des problèmes (objet des travaux de J. PIAGET) au relevé statistique des variables quantitatives du comportement.

La neurophysiologie considère, notamment, le corps en tant que support matériel du mouvement de l'information: comment telle modification de l'état d'une partie du corps, e.g. une augmentation de température ou de pression, peut se propager, non physiquement, telle quelle, comme se propage la chaleur, mais codée; et comment les diverses informations se combinent, se conservent...

Enfin, on a, de tout temps, comparé les vivants aux mécanismes les plus parfaits connus de l'homme. Nous sourions, aujourd'hui, de voir, chez de vieux auteurs (tels FÉNELON, traitant de *l'Éducation des filles*) de sages préceptes pédagogiques assortis de ce commentaire que, chez les enfants, la substance du cerveau est molle et humide...

Peut-être les automates, les programmes, qui nous semblent si utiles pour organiser en un système nos connaissances positives et suggérer des recherches, feront-ils, à leur tour, le divertissement des siècles à venir. Nous n'en renoncerons pas pour autant à confronter ici notre modèle d'instauration de code à des constructions de diverses branches de la psychologie.

Au §6.1, ayant rappelé une conception des connexions nerveuses partagée entre tout ou rien et réponse graduée, nous proposons - comme un

exercice, non comme une hypothèse - un modèle neurologique s'accordant avec le calcul de la réponse qu'effectue l'algorithme d'instauration de code.

Le §6.2 considère ensuite le processus de renforcement, sans référence directe à la physiologie, mais seulement dans les lois empiriques du comportement, que mime le modèle de calcul.

Le §6.3 met en parallèle, avec le renforcement des liens dans les modèles algorithmiques, ce qu'est la variation des connexions entre aires de projections ou rétines, selon la neurophysiologie de l'ontogénèse et de l'apprentissage.

Au §6.4, on conjecture que les notions, considérées d'abord à propos d'aires de projections sensorielles, servent, en quelque manière pour la pensée abstraite.

6.1 Connexions cellulaires et calcul de la réponse

Il y a cent vingt ans, prévalait la conception réticulaire du système nerveux. Ne distinguant pas au microscope, dans leurs détails, les éléments du tissu nerveux, les neurohistologistes admettaient que celui-ci comprenait un réseau continu de fibres anastomosées: l'influx nerveux aurait suivi les voies ainsi déterminées.

Or l'apparence qu'une coupe revêt au microscope dépend essentiellement du mode de coloration qu'on lui a appliqué. À la fin du XIX-ème siècle, GOLGI (auteur qui resta pourtant lui-même fidèle au réticularisme), proposa une méthode qui, laissant intactes (donc à peu près incolores) la plupart des cellules, en colore entièrement quelques unes que des sels d'argent ont imprégnées. Ainsi, HIS (1886-89), FOREL (1887) et, indépendamment, CAJAL (1886-90) affirmèrent-ils que chaque cellule nerveuse, ou neurone (WALDEYER, 1891) est une unité indépendante que ses prolongements mettent, avec d'autres cellules, en contact étroit, mais non en continuité.

Préfaçant, pour le public français, la traduction des premiers travaux de CAJAL (Paris 1894), M. MATHIAS-DUVAL pouvait écrire:

“Avec l'ancienne idée du réseau nerveux à connexions préétablies, fixes et définitives, les résultats de l'éducation demeuraient un problème peu compréhensible: avec les rapports de contiguïté de ses éléments, le système nerveux nous apparaît comme pour ainsi dire essentiellement malléable.”

Des modèles connexionnistes, souvent prônés en 1995, perpétuent la tradition de la neurodynamique, fondée par ROSENBLATT (1962) sur un modèle de neurone, dû à Mc CULLOCH et PITTS (1943); modèle dont le fonctionnement en tout ou rien a quelque chose de la rigidité réticulaire. Un neurone, recevant des afférences, excitatrices ou inhibitrices, d'un certain nombre d'autres neurones, resterait inerte si la somme algébrique des

afférences n'excède pas un certain seuil; au-delà, il répondrait par une impulsion (ou plutôt une salve), toujours la même, de forme déterminée. Selon un telle théorie le même codage en impulsions, discontinu dans le temps, vaudrait pour la propagation dans l'axe du neurone et le passage de la synapse (contact entre deux ou plusieurs neurones: SHERRINGTON: 1897).

Mais en 1960, comme le reconnaissait ROSENBLATT (cf. 1962, p. 31), la neurophysiologie était déjà engagée dans une toute autre voie. Selon BISHOP (cité d'après MAGOUN (1958), p. 86):

“le tissu dont est fait le neurone est capable d'une réponse graduée,..., un segment spécialisé, l'axone, y est intercalé pour assurer la transmission des messages sans que leur forme ne soit modifiée... À cette fin, outre la réponse graduée commune à tout tissu nerveux, l'axone peut donner une réponse par tout ou rien, apte... à se propager indéfiniment... La réponse graduée terminale afférente se transforme en une réponse par tout ou rien de l'axone; la fréquence et le nombre des potentiels d'action émis dans celui-ci reproduisent fidèlement, selon un code, les variations d'amplitude de la réponse à l'extrémité... Enfin, à la jonction entre l'axone et la terminaison afférente, s'accomplit la transformation inverse.”

Dans le langage des électroniciens, on peut dire que chaque synapse comprend un transformateur, présynaptique, de digital en analogique; et un autre transformateur, postsynaptique, d'analogique en digital. On conçoit la plasticité du milieu synaptique où sont réciproquement corrélées entre elles activité nerveuse d'une part, et concentrations de médiateurs chimiques de l'excitation et de l'inhibition, d'autre part.

Et Marie BRAZIER (1960) de faire écho à MATHIAS-DUVAL en ces termes:

“La loi du tout ou rien s'applique seulement à la portion conductrice principale de l'axone. Mais ce sont des mécanismes de réponse graduée qui transmettent l'excitation aux deux extrémités de ces longues fibres de communication, donnant ainsi au système nerveux une souplesse plus grande que celle permise par un tout ou rien rigide régnant sans partage.”

Avant de nous exercer à traduire, pour ainsi dire, en neurones, l'algorithme de calcul de réponse proposé au §3, apportons encore deux citations (WYBURN, (1960), pp. 11 et 159).

“Les stimuli intenses produisent, dans l'axone, davantage d'impulsions par unité de temps: ainsi la fréquence des impulsions enregistre l'intensité du stimulus. Une stimulation subliminaire, i.e. une stimulation qui ne suffit pas pour engendrer une impulsion, peut modifier l'état de polarisation de la membrane d'un neurone et ainsi favoriser l'effet de stimuli subliminaires ultérieurs; avec finalement, la décharge d'une impulsion: c'est ce qu'on appelle la sommation temporelle.”

“Du fait que, sur la peau, la cochlée, la rétine, etc..., les aires de sensibilité de divers récepteurs peuvent empiéter l'une sur l'autre, une stimulation normale provoquera la décharge simultanée de plusieurs récepteurs; avec des trains d'impulsions dont la fréquence dépendra de la position du récepteur relativement au point de stimulation.”

Considérons maintenant l'ensemble A des objets et celui B des signaux comme matérialisés chacun par une rétine formée de récepteurs (cf. *infra* §6.3); et reprenons, en termes de physiologie, le modèle proposé au §3, programmé au §4 et expérimenté au §5.

Supposons que l'on présente, à un sujet, le signal i_1 (on traiterait de même la présentation d'un objet j_1); i_1 et les récepteurs ib voisins de i_1 émettent des trains d'impulsions dont la fréquence $F(ib)$ est proportionnelle à une fonction de diffusion qui vaut 1 pour i_1 lui-même; et décroît quand croît la distance de ib à i_1 . Chaque voie (ib, ja) est parcourue par des impulsions dont la fréquence est proportionnelle au produit $F(ib) \cdot FL(ib, ja)$; où FL est une force de lien, dont on propose ci-après un schéma.

Admettons que règne d'abord une inhibition générale qui empêche qu'en réponse au signal i_1 , soit choisi un objet (pays dans l'expérience du §2; point d'un cercle dans les simulations du §5; ici, élément ja de A); après la levée d'inhibition, la première impulsion qui passe emporte la décision: e.g., si elle emprunte la voie (ib, ja), la réponse est ja .

Si la levée de l'inhibition n'est pas corrélée avec l'état de phase des différentes voies, chaque objet ja a une probabilité d'apparaître pour réponse qui est proportionnelle à la somme des fréquences des impulsions parcourant les voies qui y aboutissent, soit:

$$\sum \{F(ib) \cdot FL(ib, ja) \mid ib \in B\} .$$

Quant à la force des liens FL entre B et A, elle peut s'établir directement; ou, plutôt, résulter de l'interposition d'un ensemble C de cellules, c , entre B et A. Le corps de chaque cellule, c , est au niveau de B; et son axone aboutit à A; de telle sorte que le déclenchement de c dépende de l'activité des cellules de B et soit apte à provoquer la décharge des cellules de A. Ainsi le lien entre ib et ja s'exprimera comme une somme à laquelle contribue chaque cellule c :

$$FL(ib, ja) = \sum \{LB(ib, c) \cdot LA(c, ja) \mid c \in C\} ;$$

en fonction des liens LB et LA , entre B et C et entre C et A, respectivement.

L'interposition de cellules de type C permet que, sans refondre les couches de cellules A et B, la force des liens FL entre celles-ci soit renforcée du fait de la plasticité des prolongements des cellules c (cf. *infra*, §6.3).

6.2 Lois du renforcement dans le comportement

Les formules de renforcement sont le moteur du programme de simulation; qui, par elles, s'élève du local au global, jusqu'à ranger objets et signaux suivant une forme qui n'a pas été explicitement indiquée.

Sur le mode des renforcements, la neurophysiologie s'interroge, sans rien assurer de définitif; sinon que la plasticité du système nerveux supérieur est compatible avec l'apprentissage: fait manifeste, que toute théorie doit, *a priori*, respecter.

Avant de spéculer, au §6.3, sur l'établissement des liens entre couches de neurones, examinons ce que la statistique des expériences et l'observation psychologique générale nous apprennent du comportement des vivants.

Nous l'avons dit plus haut (§1.2), l'apprentissage n'est pas un processus physique, matériellement circonscrit: outre les stimuli, réponses et conclusions, interviennent des finalités qu'on ne saurait guère décrire par des nombres; ce qui limite la portée d'une étude mathématique des renforcements fondée sur la seule statistique des expériences d'adaptation. On a pu cependant, d'après quelques cas simples, proposer des formules générales.

HULL (1952, p. 6; cité d'après ROUANET), postule que "l'augmentation de la force de l'habitude à chaque essai renforcé est une fraction constante de l'écart à la force de l'habitude maximale". Postulat qu'on traduira par la formule:

$$\Delta p = k \cdot (1-p) \quad ;$$

où p désigne la probabilité d'un certain comportement (le maximum pour p étant 1); Δp , l'accroissement de p après un succès, i.e. un essai renforcé; et k est un coefficient ($0 < k < 1$), dépendant de la situation expérimentale et du sujet.

Considérons une expérience de prédiction. On présente à un sujet divers stimuli i de I , avec des probabilités p_i , dans un ordre aléatoire; et on lui demande, après chaque présentation, de prédire le stimulus suivant. Selon le postulat de HULL, les réponses de prédiction tendent à suivre la même loi de probabilité, $\{p_i \mid i \in I\}$, que les présentations. Il en est approximativement ainsi, en effet, si le sujet joue distraitement. Mais s'il y a un avantage matériel à répondre juste, on tend à adopter, en vue du gain, la stratégie la plus efficace, qui est de répondre toujours le i pour lequel p_i est le plus fort. D'autre part, les vérifications expérimentales concernent surtout le cas où I n'a que deux éléments; et l'accord semble moins bon s'il y en a trois.

Dans le travail déjà cité au §1, J.-M. FAVERGE, distinguant, parmi les activités des ouvriers mineurs, production et prévention (le résidu comprenant: réparation, repos...), totalise, demi-heure par demi-heure, d'une

part les temps de production, d'autre part les temps de prévention des ouvriers d'une équipe. D'où, pour un poste de huit heures, 16 couples successifs (x, y) de valeurs: x (production) et y (prévention). Et la ligne joignant ces 16 points dans l'ordre temporel, suggère une courbe convergeant en spirale vers un point limite, comme si la variation de (x, y) était régie, e.g., par un système différentiel linéaire approprié.

La conjonction de multiples causes, agissant de façon discontinue sans qu'aucune n'ait d'effet prédominant, a le même effet global que la recherche de l'équilibre dans les mouvements continus d'un système asservi. C'est ainsi que nous avons schématisé l'établissement d'un code; à cette différence essentielle près qu'il y a une infinité potentielle de points d'équilibre (les codes limite); et que c'est le hasard qui conduit vers celui où l'on se fixera.

L'examen des joueurs et l'introspection donnent, de l'établissement d'un code, une vue bien plus rationnelle que celle d'un processus aléatoire tissant un système de liens entre deux rétines.

On s'efforce de se remémorer les coups afin d'en déduire logiquement le code du partenaire. On établit consciemment une stratégie destinée à minimiser les sanctions des erreurs: e.g. répondre un pays central peu étendu, tel que la Suisse, plutôt que la France, l'Allemagne ou l'Italie. On découvre soudain, avec joie, que le partenaire code les pays par leur longitude... De cela, nous avons été sujet ou témoin (cf. §2.2.2).

Peut-on dire que ces mouvements conscients ne sont qu'un épiphénomène? comme quelques ondes, affleurant à la surface, des innombrables mouvements élémentaires dont l'équilibre établit le code; comme, selon la théorie cinétique, les lois des gaz résultent du mouvement des molécules et de leurs chocs? Ce n'est certainement pas le cas quand, dominant la tâche qui lui est imposée, le sujet apporte une solution globale systématique (cf. §2.2.1).

Si, au contraire, un joueur, dominé par la complexité géométrique du problème, n'en a qu'une représentation locale, son activité intelligente et consciente ne semble pas se distinguer des autres causes, dont la multiplicité fait de l'adaptation un processus assez semblable à notre modèle aléatoire.

Le processus d'instauration de code a été l'occasion de concevoir un algorithme liant deux ensembles A et B en respectant leurs structures; ce qui, en retour, suggère des schémas de combinaisons nerveuses susceptibles de remplir une telle fonction de liaison. La complexité du dialogue entre deux hommes qui instaurent un code dépasse assurément tout calcul; mais il y a, à l'intérieur d'un seul individu, des dialogues d'influx dont un modèle mathématique peut aider à conjecturer les effets.

6.3 Ontogénèse et renforcement des liens entre rétines internes

Le modèle d'instauration de code met en relation l'ensemble A des objets et l'ensemble B des signaux; et le processus de communication aboutit à établir, entre A et B, une correspondance stable, plus ou moins parfaite quant à la régularité cartographique.

De même, le système nerveux comporte, à divers niveaux, des couches de cellules assimilables à des plans; deux plans éloignés pouvant se correspondre biunivoquement par les signaux qu'ils échangent.

L'exemple le plus connu est fourni par la rétine de l'œil, où se superposent plusieurs couches, formées de cellules, de nature différente, liées entre elles par de multiples synapses. En bref, on dira que, des cônes et bâtonnets, éléments sensibles à la lumière, l'influx nerveux passe aux cellules bipolaires; puis aux cellules ganglionnaires dont les axones, rassemblés dans le nerf optique, gagnent le cerveau. Mais les interactions transverses, au niveau de la rétine, jouent un rôle essentiel en transformant l'image primaire qui n'est qu'un ensemble de points, en une image interprétée comme un ensemble de traits et de fronts de contraste.

D'autre part, on distingue, dans le cortex cérébral, six couches contenant les corps de cellules nerveuses. Une région du cortex reçoit des influx portés par les axones de cellules dont le corps est ailleurs; et elle-même émet des influx par les axones de certaines de ses cellules. L'élaboration de l'information représentée par ces influx s'effectuant localement; principalement au sein de structures, pluricellulaires mais très petites (e.g., chez l'homme: 3 mm de longueur sur 0,5 mm de diamètre), appelées colonnes corticales.

En particulier, on reconnaît, dans la partie occipitale du cerveau, un cortex visuel primaire (aire striée) qui, en bref, correspond biunivoquement avec la rétine; la liaison n'étant pas directe, cependant; car l'influx transmis par le nerf optique ne parvient au cortex qu'avec un relais intermédiaire situé dans le thalamus, à la base du cerveau.

Quand une couche étendue homogène d'éléments du système nerveux remplit une fonction de représentation interprétable spatialement, en relation avec d'autres couches analogues, on parle communément de rétine; l'aire de projection visuelle corticale étant, e.g., une rétine interne.

La neurophysiologie s'interroge sur la nature et l'origine de la correspondance établie entre deux rétines A et B. La souplesse des axones interdit de postuler qu'une sorte de rigidité mécanique réalise matériellement l'isomorphisme entre A et B. On conjecture donc que, dans l'ontogénèse (i.e. l'édification de l'individu), c'est le signal même transmis par l'axone issu d'un

point *a* de A (voire une structure chimique liée à l'axone) qui impose, de façon stricte, que la synapse ne puisse s'établir qu'avec un élément déterminé, *b*, de B. Ultérieurement, les liens étant consolidés, passeraient entre A et B des informations variées que B a pour fonction d'élaborer.

Cette hypothèse s'accorde avec les expériences de R. SPERRY, relatives à la régénération du nerf optique chez la grenouille, après section complète; la grenouille se distinguant toutefois des vertébrés supérieurs par le fait que le nerf optique y accède, sans relais, au toit du cerveau (plus précisément au *tectum opticum* du mésencéphale; cf., e.g., GRASSÉ et coll., 1965; p. 672).

Mais une autre hypothèse, plus globale, moins dépendante d'un code de raccordement préétabli, semble autorisée (au moins pour certains couples de rétines) par le succès relatif du processus d'instauration de code; ainsi que par l'aptitude de l'approximation stochastique (cf. *infra*, §6.4) à reconnaître une structure, comme le fait une analyse de correspondance.

Selon cette deuxième hypothèse, les liens d'isomorphismes entre A et B seraient choisis et renforcés au cours d'un processus de communication, non par messages élémentaires issus d'une seule cellule *a*, mais par des messages complexes mettant essentiellement en jeu plusieurs cellules.

Dans son classique traité de "*Neuroanatomie clinique*", André GOUAZÉ écrit:

"À la naissance, le cortex ne fonctionne pas... l'enfant ne présente alors qu'un comportement automatico-réflexe et des réactions purement instinctives, sous-corticales. Au fur et à mesure que le cortex étend ses connexions et que des chaînes de neurones de plus en plus nombreuses entrent en fonction, les réactions sensorielles s'établissent, les activités psychiques se développent."

Même en réservant la part de la schématisation pédagogique, l'auteur cité affirme que des connexions requises pour les fonctions corticales ne peuvent s'établir que dans la vie extra-utérine; donc par l'apprentissage de ces fonctions avec des stimuli exogènes.

Ici, le modèle du processus d'instauration de code ne peut, sans doute, être pris tel quel: car, dans ce processus, la même matrice de liens entre A et B sert, à la fois, au codage et au décodage; ce qu'on traduirait le plus directement en postulant que des axones (éventuellement ceux des cellules connectrices *c*, introduites au §6.1) sont parcourus dans les deux sens: de A vers B et de B vers A. Or, sauf exception, dans l'axone, l'influx, issu du corps cellulaire, est centrifuge.

Voici donc un autre modèle: la rétine A est formée de cellules, *a*, dont les axones vont vers B; B comprend une couche de récepteurs, *b*; et, de plus, un

ensemble C de cellules de connexion, ou relais, β . Chaque β , par ses dendrites, intègre les influx apportés par les axones de plusieurs cellules a ; si β répond par une impulsion, celle-ci, par l'axone de β peut atteindre les dendrites d'un récepteur b , ou de plusieurs. Afin de multiplier les contacts, on peut éventuellement supposer que l'axone de β est ramifié; comme pour les cellules sensitives, dont l'axone, pénétrant dans la moelle, se met simultanément en rapport avec la substance grise des segments voisins sus- et sous-jacents (GOUAZÉ, p. 66).

À la vérité, moins encore qu'au §6.1, dans le calcul de la réponse, nous ne pouvons proposer ici un modèle histologique; et peut-être vaudrait-il mieux user du terme abstrait d'effecteur ou de composant plutôt que de celui, trop concret, de cellule. Mais, vu l'efficacité des algorithmes de simulation, nous voulons suggérer aux neurologistes que les composants du système nerveux, avec l'infinie diversité de leurs synapses (cf. LAGET, 1970), se prêtent, *a fortiori*, à des constructions ayant le même effet que ces algorithmes.

Supposons que, sur la rétine A, sont présentés des stimuli étendus, auxquels plusieurs des cellules a peuvent répondre, simultanément, par des impulsions que les axones de ces cellules transportent vers la seconde rétine, B. Ainsi, sont stimulées, directement, des cellules relais β ; et indirectement, un ou plusieurs récepteurs, b .

Faisons encore l'hypothèse que le renforcement affecte positivement les synapses d'un relais β avec les cellules b en activité; et négativement les autres synapses.

Afin de retrouver un processus mathématique analogue à celui de l'instauration d'un code, considérons, d'abord, des stimuli s'étendant seulement à deux cellules voisines, a_1 et a_2 . Un acte de communication élémentaire entre A et B mettra en jeu trois cellules, $\{a_1, a_2, b\}$; les liens de b avec $\{a_1, a_2\}$ étant établis par les relais β .

On peut, pour calculer le lien $F(a, b)$, entre a et b , en fonction des liens $FB(\beta, b)$ et $FA(a, \beta)$ existant, respectivement, entre les relais β et le corps cellulaire de b , ou la terminaison, dans la couche B, de l'axone de a , reprendre la formule du §6.1:

$$FL(a, b) = \sum \{FA(a, \beta) \cdot FB(\beta, b) \mid \beta \in C\} .$$

En général, la probabilité Pr du triple $\{a_1, a_2, b\}$ sera proportionnelle à une fonction $St(a_1, a_2)$, indice de stimulation conjointe des deux cellules (indice estimé, e.g., par la valeur moyenne du produit de l'activité des deux récepteurs, a_1 et a_2 , pour une classe déterminée de stimuli étendus, reçus par A):

$$\text{Pr}(a_1, a_2, b) = \text{St}(a_1, a_2) \cdot \text{FL}(a_1, b) \cdot \text{FL}(a_2, b) \ ;$$

Cette fonction est analogue à la fonction de renforcement du modèle d'instauration de code (cf. §3.3); car $\text{St}(a_1, a_2)$, qui décroît quand augmente la distance entre a_1 et a_2 , y joue le rôle de l'indice de proximité (caractérisant le succès d'une communication).

Au cours du renforcement, les processus cellulaires se développent ou régressent; et certains relais β , dont les synapses ne sont pas renforcées, peuvent même disparaître par apoptose.

On a vu, au §5.4, l'efficacité de la procédure de densification des couches A et B introduite au §4.4: ainsi, d'un isomorphisme grossier, mais régulier, établi d'abord entre A et B, on passe à un isomorphisme à la fois fin et régulier, qui n'aurait pu être créé d'emblée sans consolider des replis aléatoires. Une semblable densification peut ici résulter de plusieurs causes.

D'une part, l'attention du sujet se fixant graduellement sur des stimuli au dessin plus délié, ou moins instables, la fonction $\text{St}(a_1, a_2)$ définirait un seuil plus étroit d'interaction entre a_1 et a_2 . D'autre part, la raréfaction des relais β , en allégeant le réseau des liens entre cellules de type a et b, libérerait chaque cellule de la contagion de ses voisines.

6.4 Conclusion: l'enclume sensible

Quand on soumet à l'analyse factorielle un tableau de correspondance $I \times J$, il s'agit d'ensembles finis I et J actuellement dénombrés; de même que les $k(i, j)$ sont (approximativement au moins) mesurés ou observés. Mais l'ensemble fermé I, des individus, n'intéresse que comme le représentant actuel et contingent d'un ensemble potentiellement infini (les animaux d'une espèce; les sujets atteints d'une même maladie...); et par l'observation d'un ensemble J de traits, on vise à saisir l'essence de I.

De ce point de vue, à l'algorithme usuel qui détermine les facteurs par la résolution d'un système d'équations algébriques prenant simultanément en compte toutes les données, on préférera l'algorithme d'approximation stochastique; lequel, partant d'un état initial arbitraire des facteurs (e.g., pour deux facteurs, deux vecteurs quelconques dont les composantes sont indicées par J), utilise chaque individu nouveau qui se présente afin de retoucher ces facteurs; la convergence vers les valeurs exactes des facteurs se faisant, au cours du temps, en traitant, suivant une formule fixée *a priori*, des informations apportées par un grand nombre d'individus, successivement présentés (cf. [APPR. CORR.], in *CAD*, Vol. VII, pp. 387-394, 1982).

L'analogie avec la construction des liens entre deux rétines est claire. À l'ensemble I des individus, décrits chacun par ses composantes sur J,

correspond, l'ensemble des stimuli étendus appliqués à la rétine d'entrée, A; représenter A sur B par des liens quasi binunivoques, c'est comme donner à chaque *a* des coordonnées factorielles dans le plan que constitue la rétine B. Et les renforcements des liens suivent un processus dont le caractère stochastique résulte de la présentation aléatoire des stimuli.

“Quand nous comptons explicitement des unités en les alignant dans l'espace, n'est-il pas vrai qu'à côté de cette addition dont les termes identiques se dessinent sur un fond homogène, il se poursuit dans les profondeurs de l'âme, une organisation de ces unités les unes avec les autres, processus tout dynamique, assez semblable à la représentation purement qualitative qu'une enclume sensible aurait du nombre croissant des coups de marteau ?”

Cette image proposée par Henri BERGSON, dans son *Essai sur les données immédiates de la conscience*, (la citation est commentée ailleurs avec son contexte: cf. [BERGSON], in *CAD*, Vol. VII, pp. 395-412, 1982) invite le statisticien psychologue à concevoir, dans le cortex du cerveau, une mosaïque de rétines abstraites où les objets de la pensée sont ordonnés suivant un plan spatial qui concilie la contrainte des structures neurophysiologiques avec les rapports que multiplie, entre les objets, le libre jeu de l'imagination.

L'ordre de chaque rétine consisterait dans sa correspondance avec les autres, établie d'après la cooccurrence des afférences entre plusieurs voies. On a déjà rappelé, au §1.3, qu'ARISTOTE note dans sa psychologie que, si nous n'avions plusieurs sens, nous ne pourrions connaître les sensibles communs, mouvement, grandeur et nombre, que nous révèle la convergence des afférences des divers sens spéciaux. De même, une forme de l'abstraction se consoliderait, par l'élaboration, entre des plans, de liens graduellement ordonnés.

Spéculant sur la capacité des semences à produire des plantes, les philosophes ont pu, de tout temps, concevoir la structure des êtres vivants les plus complexes comme définie par un hiérarchie de germes dont la finesse se déroberait aux regards. Ainsi (dans un texte cité et commenté in [FLÈCHE], *CAD*, Vol XVIII, n°1, pp. 97-118; texte qu'on rapprochera de celui cité, plus haut, au §1.3) Saint Augustin écrit-il:

Ecce enim brevissimus surculus semen est; nam convenienter mandatus terræ arborem facit. Hujus autem surculi subtilius semen aliquod ejusdem generis granum est, et hucusque nobis visibile. Jam vero hujus etiam grani semen quamvis oculis videre nequeamus, ratione tamen conjicere possumus...

“Le plus court des rejetons est un germe: car convenablement confié à la terre, il fait un arbre. De ce rejeton, une graine de son espèce est aussi un germe, plus délié; et jusque là nous voyons. Mais de cette graine, nous pouvons encore, par la raison, conjecturer un germe...”

Sous le nom de *préformation*, fut reçue, dans les siècles passés, une théorie selon laquelle les systèmes les plus complexes existent dans l'œuf dès le stade le plus précoce. Plus réservé, HARVEY (1651; cité d'après HAMBURGER et coll. 1975), conjecture une croissance par superposition, une *épigenèse*, "l'organisme dérivant d'une séquence d'événements en relation causale successive".

Dans l'observation des germes, la génétique contemporaine, servie par la biologie moléculaire, s'est avancée, sinon à l'infini, du moins bien au-delà de ce que l'œil a toujours pu voir. Mais, particulièrement pour construire le système nerveux, la neurologie croit devoir réserver la place de ce que J.-P. CHANGEUX (1983) appelle, à juste titre, une *épigenèse*. De cette construction, l'algorithme d'instauration d'un code ne nous suggère-t-il pas la trame mathématique ?

Pour beaucoup d'auteurs contemporains, *structure mentale de traitement de l'information* s'identifie avec *configuration de synapses*.

Certes, en l'état rudimentaire de nos connaissances sur un codage chimique éventuel de l'information acquise par l'esprit (sur un tel codage cf. [FLÈCHE], §2, *in fine*), les modèles que l'on peut concevoir sont tous assimilables à des réseaux de telles configurations. Mais la présence de couches planes homogènes dans le cortex et l'interprétation certaine des coordonnées des unités histologiques dans de telles rétines internes, autorisent à attribuer un rôle à une représentation continue de l'information.

Au-delà de l'interprétation psychophysique directe, propre aux aires de projection sensorielle, on conçoit que, par un processus analogue à celui conjecturé pour l'instauration d'un code, l'élaboration d'informations de toute nature aboutisse à créer, dans le cortex, des rétines abstraites.

Ainsi, mise en mémoire, rappel des souvenirs élaborés, reconnaissance des formes, se fonderaient sur des structures où l'arborescence n'aurait pas la prépondérance prônée, dans l'informatique d'aujourd'hui, par les techniciens des bases de données. En harmonie, avec l'introspection de ceux qui se fient à l'intuition, ranger et chercher ce serait se déplacer dans un espace assez semblable à celui que contemple la vue; ou, du moins, dans une mosaïque de tels espaces.

On l'a dit au §3.0: la structure des processus cognitifs évoque, pour nous, non un réseau de liens, fût-il adaptable, mais une assemblée de processeurs travaillant parallèlement dans une configuration hiérarchique gérée selon une analyse globale des informations. Or, pour la technique contemporaine, il apparaît facile de multiplier les processeurs; la limite portant plutôt sur la capacité à faire circuler les résultats élaborés, afin de les confronter.

Une telle limite existe, sans doute, encore plus stricte, dans les structures vivantes.

Comparant activité naturelle et tâches expérimentales, nous avons noté, au §1.2, qu'une inhibition quasi générale nous garde du monde extérieur. Ne nous gardons-nous pas aussi du monde intérieur ? ne somnole-t-il pas, comme laissé à lui-même, ou plutôt privé du droit à la parole, sinon là où la volonté l'interroge ? Dans l'appel à la mémoire, dans la reconnaissance des formes, inhibition ou éveil des zones du cortex serait fonction de coordonnées continues attribuées à l'objet qu'il faut retrouver ou reconnaître.

Références bibliographiques

Sanctus Aurelius Augustinus, (Saint AUGUSTIN): *De Trinitate*; L.III; in *Patrologie Latine*, Vol. 42: coll. 875 sqq.

H. BERGSON : *Essai sur les données immédiates de la conscience* ; Paris; (1888).

M. A. B. BRAZIER : *The electrical activity of the nervous system* ; Pitman Publishing co; London; (1960).

J.-P. CHANGEUX : *L'homme neuronal* ; Fayard; Paris; (1983).

A. GOUAZÉ : *Neuroanatomie clinique* ; Expansion scientifique française; Paris; (1978).

P.-P. GRASSÉ & Ch. DEVILLERS : *Zoologie, II : Vertébrés* ; Masson; Paris; (1965).

J. HAMBURGER et coll. : *Dictionnaire de Médecine* ; Flammarion; Paris; (1975)... (1982).

C. L. HULL : *A behavior System* ; Yale University Press; New Haven; (1952)

P. LAGET : *Relations synaptiques et non synaptiques entre les éléments nerveux* ; Masson; Paris; (1970).

W. S. Mc CULLOCH & W. PITTS : "A logical calculus of the ideas immanent in the nervous activities" ; in *Bull. Math. Biophysics*, 5, pp. 115-133; (1943).

H. W. MAGOUN : *The waking brain* ; C. Thomas, Springfield Ill. U.S.A.; (1958); traduction française de S. Dumont; P.U.F.; Paris; (1960).

Santiago RAMON y CAJAL : *Les nouvelles idées sur la structure du système nerveux chez l'homme et chez les vertébrés* ; traduction AZOULAY; C. Reinwald et cie.; Paris; (1894).

F. ROSENBLATT : *Principles of neurodynamics* ; Spartan Books; Washington; (1962).

H. ROUANET : *Recherche sur les modèles stochastiques d'apprentissage* ; Thèse; Paris ; (1964).

G. M. WYBURN : *The nervous system* ; Academic Press; London, N.Y.; (1960).