

Rupert Sheldrake

Une nouvelle science de la vie



ÉDITIONS DU
ROCHER

UNE NOUVELLE SCIENCE DE LA VIE

DU MÊME AUTEUR
CHEZ LE MÊME ÉDITEUR

L'Âme de la nature.

*Ces chiens qui attendent leur maître et autres pouvoirs inexplicables
des animaux.*

La Mémoire de l'univers.

Sept expériences qui peuvent changer le monde.

RUPERT SHELDRAKE

UNE NOUVELLE SCIENCE DE LA VIE

L'Hypothèse de la causalité formative

*Traduit de l'anglais par Paul Couturiau,
Christel Rollinat et Christian Supera*

ÉDITIONS DU
ROCHER
Jean-Paul Bertrand

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés pour tous pays.

© 1981 by Rupert Sheldrake.

© Éditions du Rocher, 1985 ; 2003.

ISBN 2 268 04805 5

A Dom Bede Griffiths

SOMMAIRE

PRÉFACE	13
INTRODUCTION	15
1. LES PROBLÈMES IRRÉSOLUS DE LA BIOLOGIE	21
1.1 Le cadre du succès	21
1.2 Les problèmes de la morphogenèse	23
1.3 Le comportement	27
1.4 L'évolution	28
1.5 L'origine de la vie	29
1.6 Les limitations de l'explication physique	30
1.7 La psychologie	31
1.8 La parapsychologie	33
1.9 Conclusions	34
2. TROIS THÉORIES DE LA MORPHOGENÈSE	37
2.1 Recherche descriptive et expérimentale	37
2.2 Le mécanisme	39
2.3 Le vitalisme	47
2.4 L'organicisme	54

3. LES CAUSES DE LA FORME.....	61
3.1 Le problème de la forme.....	61
3.2 Forme et énergie.....	66
3.3 La prévision des structures chimiques.....	71
3.4 La causalité formative.....	78
4. LES CHAMPS MORPHOGÉNÉTIQUES.....	83
4.1 Les germes morphogénétiques.....	83
4.2 La morphogenèse chimique.....	86
4.3 Les champs morphogénétiques en tant que « structures de probabilité ».....	90
4.4 Les processus probabilistes en morphogenèse biologique	92
4.5 Les germes morphogénétiques dans les systèmes biolo- giques.....	96
5. LES INFLUENCES DES FORMES PASSÉES.....	101
5.1 La constance et la répétition des formes.....	101
5.2 La possibilité générale des connexions trans- temporelles causales.....	103
5.3 La résonance morphique.....	104
5.4 L'influence du passé.....	105
5.5 Les implications d'une résonance morphique atténuée..	111
5.6 Un test expérimental possible.....	113
6. CAUSALITÉ FORMATIVE ET MORPHOGENÈSE.....	119
6.1 Les morphogenèses séquentielles.....	119
6.2 La polarité des champs morphogénétiques.....	120
6.3 La taille des champs morphogénétiques.....	121
6.4 La spécificité croissante de la résonance morphique durant la morphogenèse.....	122
6.5 La préservation et la stabilité des formes.....	124
6.6 Quelques propos sur le « dualisme » physique.....	125
6.7 Un résumé de l'hypothèse de la causalité formative.....	126

7. L'HÉRITAGE DES FORMES.....	131
7.1 Génétique et hérédité.....	131
7.2 Les germes morphogénétiques modifiés.....	133
7.3 La voie modifiée de la morphogenèse.....	137
7.4 La dominance.....	138
7.5 Les ressemblances familiales.....	141
7.6 Les effets environnementaux et la résonance morphique	142
7.7 L'héritage des caractéristiques acquises.....	144
8. L'ÉVOLUTION DES FORMES BIOLOGIQUES.....	149
8.1 La théorie néo-darwinienne de l'évolution.....	149
8.2 Les mutations.....	152
8.3 La divergence des chréodes.....	153
8.4 La suppression des chréodes.....	156
8.5 La répétition des chréodes.....	158
8.6 L'influence des autres espèces.....	160
8.7 L'origine des formes nouvelles.....	162
9. LES MOUVEMENTS ET LES CHAMPS MOTEURS.....	165
9.1 Introduction.....	165
9.2 Les mouvements des végétaux.....	166
9.3 Le mouvement amibien.....	169
9.4 La morphogenèse répétitive des structures spécialisées..	170
9.5 Les systèmes nerveux.....	171
9.6 Champs morphogénétiques et champs moteurs.....	175
9.7 Les champs moteurs et les sens.....	179
9.8 Régulation et régénération.....	181
10. L'INSTINCT ET L'APPRENTISSAGE.....	185
10.1 L'influence des actions passées.....	185
10.2 L'instinct.....	188
10.3 Les stimuli par signes.....	189
10.4 L'apprentissage.....	192

10.5 Les tendances innées à apprendre.....	196
 11. L'HÉRITAGE ET L'ÉVOLUTION DU COMPORTE- MENT.....	 199
11.1 L'héritage du comportement.....	199
11.2 Résonance et comportement : une expérience.....	201
11.3 L'évolution du comportement.....	208
11.4 Comportement humain.....	211
 12. QUATRE CONCLUSIONS POSSIBLES.....	 215
12.1 L'hypothèse de la causalité formative.....	215
12.2 Le matérialisme modifié.....	216
12.3 Le Soi conscient.....	218
12.4 L'univers créatif.....	222
12.5 La réalité transcendante.....	223
 RÉFÉRENCES.....	 225

PRÉFACE

La majorité des biologistes considèrent que les organismes vivants ne sont rien de plus que des machines complexes, gouvernées par les seules lois connues de la physique et de la chimie. J'ai longtemps partagé leur conception. J'en suis toutefois arrivé, au fil du temps, à considérer qu'il était difficile de justifier une telle vision des choses. Il subsiste encore tellement d'inconnues que nous devons au moins accepter l'éventualité que certains phénomènes de la vie soient gouvernés par des lois ou par des facteurs méconnus des sciences physiques.

Plus je m'interrogeais sur les problèmes irrésolus de la biologie, plus je m'imprégnais de la conviction que l'approche conventionnelle est inutilement restrictive. Je me suis donc efforcé d'imaginer les éléments possibles d'une nouvelle science — plus vaste — de la vie. C'est au cours de cette réflexion que l'hypothèse exposée dans cet ouvrage a progressivement pris forme. Comme toute hypothèse nouvelle, elle est essentiellement spéculative et devra encore être testée expérimentalement avant que sa valeur intrinsèque ne puisse être évaluée.

Mon intérêt pour ce genre de problèmes s'est développé au cours de ma collaboration (qui remonte à 1966) avec des scientifiques et des philosophes engagés dans l'exploration de « régions » se situant entre la science, la philosophie et la religion. Ce groupe, connu sous le nom de Philosophes de l'Epiphanie, organisait de nombreux séminaires et rencontres informelles à Cambridge ainsi que sur la côte du Norfolk. Je tiens à exprimer ma gratitude à plusieurs de ses membres : le professeur Richard Braithwaite, Melle Margaret Masterman, le révérend Geogfrey et Mme Gladys Keable, Melle Joan Miller, le Dr Ted Bastin, le Dr Christopher Clarke et le professeur

Dorothy Emmet qui est également l'éditeur de *Theoria of Theory*, la revue trimestrielle du groupe.

Pendant les quatre années que j'ai passées en Inde — de 1974 à 1978 — au *International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics*, j'ai eu de très enrichissantes discussions avec mes amis et collègues de Hyderabad ; j'ai également eu la chance d'avoir accès à la précieuse bibliothèque de la regrettée Mme J.B.S. Haldane.

La première version de ce livre a été écrite au cours de mon séjour d'un an et demi à l'Ashram Shantivanam, à Tiruchirapalli, Tamil-nâd. Je remercie les membres de cette communauté qui ont rendu mon séjour si agréable et plus particulièrement Dom Bede Griffiths, à qui je dédie cet ouvrage, Melle Dina Nanavathy de la Bibliothèque du Consulat Britannique de Bombay qui a aimablement mis à ma disposition les ouvrages nécessaires à mon travail.

A mon retour en Angleterre, de nombreux amis m'ont aidé à mettre au point la seconde version de ce livre ; je les remercie pour leurs conseils et leurs encouragements. Je tiens également à remercier les quelque cinquante personnes qui ont relu mon manuscrit et m'ont fait bénéficier de leurs critiques et de leurs commentaires. Je mentionnerai en particulier : M. Anthony Appiah, le D^r John Belof, le professeur Richard Braithwaite, le D^r Keith Campbell, Mme Jennifer Chambers, le D^r Christopher Clarke, la Marquise de Dufferin et Ava, le professeur Dorothy Emmet, le D^r Roger Freedman, le D^r Alan Gauld, le D^r Brian Goodwin, le D^r John Green, M. David Hart, le professeur Marry Hesse, Mme Gladys Keable, le D^r Richard LePage, Melle Margaret Masterman, le professeur Michael Morgan, M. Frank O'Meara, M. Jeremy Prynne, l'honorable Anthony Ramsay, Mme Jillian Robertson, le D^r Tsui Sachs, le professeur W.H. Thorpe, F.R.S.*, le D^r Ian Thompson, Mme R. Tickell (Renée Haynes), Fr E. Ugarte, S.J.***, et le D^r Norman Williams.

Je remercie le D^r Keith Roberts qui a réalisé les dessins et les diagrammes qui illustrent ce livre. Le D^r Peter Lawrence m'a très aimablement fourni les drosophiles qui ont servi de modèles aux dessins de la Figure 17, et M. Brian Snode, les feuilles de pois de la figure 18.

Je remercie enfin M. Mohammed Ibrahim, Mme Pat Thoburn et Mme Eithne Thompson qui ont dactylographié les premiers jets de ce manuscrit et M. Philip Kestelman et Mme Jenny Reed qui m'ont aidé à relire les épreuves.

* F.R.S. : Membre de la Société Royale.

** S.J. : Membre de la Societas Jesu.

INTRODUCTION

L'approche orthodoxe de la biologie nous est aujourd'hui dictée par la théorie mécaniste de la vie : les organismes vivants sont considérés comme des machines physico-chimiques, et les phénomènes de la vie comme explicables, en principe, en termes de physique et de chimie. (1)*

Ce paradigme mécaniste (2) n'est nullement nouveau ; il domine en fait notre culture depuis plus d'un siècle. Si la plupart des biologistes y adhèrent toujours, c'est qu'il donne des résultats : il fournit un cadre de pensée au sein duquel il est possible de poser des questions sur les mécanismes physico-chimiques des processus de vie — et d'y répondre.

Cette approche a connu des succès spectaculaires, tels que le déchiffrement du code génétique, ce qui constitue un argument important en sa faveur. Certains esprits critiques ont cependant avancé de bonnes raisons pour douter du fait que tous les phénomènes de la vie, y compris chez l'homme, puissent être expliqués de manière entièrement mécaniste. (3) Force nous est pourtant d'admettre que même si l'approche mécaniste est sérieusement limitée, en pratique comme en principe, nous ne pouvons l'abandonner purement et simplement ; elle est à l'heure actuelle la seule approche disponible pour la biologie expérimentale et elle persistera tant que nous ne lui aurons pas trouvé une alternative positive.

Toute théorie nouvelle capable d'élargir ou de transcender la théorie mécaniste ne pourra se contenter d'affirmer que la vie implique des qualités ou des facteurs actuellement inconnus des sciences physiques : elle devra préciser en quoi consiste ces qualités ou ces facteurs,

* Les chiffres entre parenthèses renvoient aux notes en fin de chapitre. N. d. T.

comment ils fonctionnent et quelles sont leurs relations avec les processus physico-chimiques connus.

La manière la plus simple de modifier la théorie mécaniste reviendrait à supposer que les phénomènes de la vie dépendent d'un nouveau type de facteur causatif, inconnu des sciences physiques, qui interagit avec les processus physico-chimiques dans les organismes vivants. Diverses versions de cette théorie vitaliste ont été proposées au cours de ce siècle (4), mais aucune n'a réussi à avancer des prédictions susceptibles d'être testées pas plus qu'à suggérer de nouvelles formes d'expériences. Si, ainsi que le dit Karl Popper, « le critère de la reconnaissance scientifique d'une théorie est sa capacité à être falsifiée, réfutée ou testée, » (5) le vitalisme n'a pas encore gagné ses lettres de noblesse.

La philosophie « organiciste » ou holiste fournit un cadre pour une révision éventuellement encore plus radicale de la théorie mécaniste. Cette philosophie conteste que toute chose dans l'univers soit explicable par rapport aux propriétés d'atomes, ou par rapport à n'importe quelle hypothétique particule ultime de matière. Elle reconnaît plutôt l'existence de systèmes organisés de manière hiérarchique qui, à chaque niveau de complexité, possèdent des propriétés qui ne peuvent être pleinement comprises en fonction des propriétés de chacun de leurs composants envisagé individuellement ; à chaque niveau le tout est supérieur à la somme de ses parties. Ces tous peuvent être envisagés comme étant des *organismes* — ce terme est utilisé délibérément dans un sens large afin d'inclure non seulement des animaux, des plantes, des organes, des tissus et des cellules mais encore des cristaux, des molécules, des atomes et des particules élémentaires. Cette philosophie propose donc un changement de paradigme dans les sciences biologiques *et* physiques : de la machine à l'organisme. Ainsi que l'affirma A.N. Whitehead : « La biologie est l'étude des grands organismes, alors que la physique est l'étude des petits organismes. » (6)

De nombreux auteurs, parmi lesquels des biologistes, ont présenté diverses versions de cette philosophie organiciste au cours des cinquante dernières années. (7) Il nous faut toutefois admettre que si l'organicisme désire exercer une influence autre que superficielle sur les sciences naturelles, il doit pouvoir présenter des prédictions vérifiables. Ce qui n'est pas le cas à ce jour. (8)

Les raisons de cet échec paraissent particulièrement évidentes dans les secteurs de la biologie où la philosophie organiciste s'est montrée

la plus influente, à savoir l'embryologie et la biologie du développement. Le concept organiciste le plus important avancé à ce jour est celui des *champs morphogénétiques*. (9) Ces champs sont censés expliquer ou décrire la formation des formes caractéristiques des embryons et des autres systèmes en développement. L'ennui est que ce concept est utilisé de manière ambiguë. Le terme lui-même semble impliquer l'existence d'un nouveau type de champ physique jouant un rôle dans le développement des formes. Certains théoriciens organicistes nient cependant suggérer l'existence de tout nouveau type de champ, d'entité ou de facteur actuellement méconnus de la physique ; (10) ils ne recourent à cette terminologie organiciste que pour fournir une nouvelle manière de *parler* des systèmes physico-chimiques complexes. (11) Cette approche ne devrait pas mener bien loin. Le concept des champs morphogénétiques ne peut avoir de valeur scientifique pratique que s'il débouche sur des prédictions vérifiables qui diffèrent de celles de la théorie mécaniste conventionnelle. Or, de telles prédictions ne sont possibles que si l'on considère que les champs morphogénétiques ont des effets mesurables.

L'hypothèse avancée dans cet ouvrage se fonde sur l'idée que les champs morphogénétiques ont bel et bien des effets physiques mesurables. Elle suggère que les champs morphogénétiques spécifiques sont responsables de la forme et de l'organisation spécifique des systèmes à tous les niveaux de complexité, non seulement dans le secteur de la biologie mais encore dans ceux de la chimie et de la physique. Ces champs ordonnent les systèmes avec lesquels ils sont associés en influant sur des événements qui, d'un point de vue énergétique, paraissent indéterminés ou probabilistes ; ils imposent des restrictions ordonnées aux conséquences énergétiquement possibles des processus physiques.

Si les champs morphogénétiques sont responsables de l'organisation et de la forme des systèmes matériels, ils doivent eux-mêmes avoir des structures caractéristiques. Quelle est donc l'origine des structures de ces champs ? La réponse que je propose ici est qu'elles sont dérivées des champs morphogénétiques de systèmes similaires précédents : les champs morphogénétiques de tout système passé deviennent *présents* pour tout système similaire ultérieur ; les structures des systèmes passés affectent les systèmes similaires ultérieurs par une influence cumulative agissant à la fois à travers l'espace *et le temps*.

Selon cette hypothèse, des systèmes sont organisés d'une manière

précise parce que des systèmes semblables étaient organisés de la même manière par le passé. Ainsi, les molécules d'une substance chimique organique complexe se cristallisent selon une forme géométrique définie parce que cette même substance s'est cristallisée de cette manière par le passé ; un végétal adopte la forme caractéristique de son espèce parce que les membres passés de cette espèce l'ont adoptée avant lui ; et un animal agit instinctivement d'une manière spécifique parce que des animaux similaires se sont comportés ainsi auparavant.

Cette hypothèse s'attache à la *répétition* des formes et des modèles d'organisation ; la question de l'*origine* de ces formes et de ces modèles sort donc de son cadre. Il est néanmoins possible d'y répondre de diverses façons, toutes paraissant également compatibles avec le mode suggéré de la répétition. (12)

Il est possible de déduire de cette hypothèse un certain nombre de prédictions vérifiables qui diffèrent fortement de celles de la théorie mécaniste conventionnelle. Je n'en veux qu'un seul exemple : si un animal, un rat par exemple, apprend un nouveau type de comportement, les rats similaires suivants (c'est-à-dire de même race et ayant été élevés dans des conditions identiques, etc.) apprendront plus facilement ce même type de comportement. Plus le nombre de rats apprenant cette tâche est grand, plus les rats similaires suivants l'apprendront facilement. Ainsi, si des milliers de rats étaient entraînés à réaliser une nouvelle tâche dans un laboratoire de Londres, des rats similaires devraient apprendre à réaliser cette même tâche beaucoup plus rapidement, et ce dans n'importe quel autre laboratoire. Il suffit pour s'en convaincre de noter la vitesse d'apprentissage de rats dans un autre laboratoire, à New York par exemple, avant et après l'entraînement des rats du laboratoire de Londres : on remarquera que dans le second cas les rats ont appris beaucoup plus rapidement que dans le premier. Cette expérience doit être réalisée sans qu'il y ait la moindre relation ou communication physique connue entre les deux laboratoires.

Une telle prédiction paraît tellement improbable qu'on peut la juger absurde. Or, des études de rats en laboratoire en ont déjà démontré la réalité. (13)

Cette hypothèse, nommée « hypothèse de la causalité formative », conduit à une interprétation de beaucoup de phénomènes physiques et biologiques radicalement différente de celle des théories existantes et permet de considérer divers problèmes bien connus sous un autre

éclairage. Je présenterai dans ce livre cette hypothèse sous une forme préliminaire, je discuterai certaines de ses implications et je proposerai plusieurs moyens pour en tester l'exactitude.

NOTES

- (1) Pour une discussion particulièrement lucide de ce point, cf Monod (1970).
- (2) Dans le sens de Kuhn (1962).
- (3) P. ex : Russel (1945) ; Elsässer (1958) ; Polanyi (1958) ; Beloff (1962) ; Kœstler (1967) ; Lenartowicz (1975) ; Popper et Eccles (1977) ; Thorpe (1978).
- (4) P. ex : Bergson (1896 et 1907) ; Driesch (1908). Pour une discussion de l'approche vitaliste, cf Sheldrake (1980 b).
- (5) Popper (1965), p. 37.
- (6) Whitehead (1928).
- (7) P. ex. : Woodger (1929) ; von Bertalanffy (1933) ; Whyte (1949) ; Elsässer (1966), Kœstler (1967) ; Leclerc (1972).
- (8) Au cours d'une récente conférence sur « les Problèmes du Réductionnisme en biologie », l'incapacité de l'approche organiciste à se démarquer de manière significative de la recherche biologique a été illustrée par l'accord général entre les mécanistes et les organicistes... *en pratique*. Ceci amena l'un des participants à remarquer que : « la polémique entre réductionnistes en antiréductionnistes parmi les biologistes risque d'avoir aussi peu d'importance et d'impact sur l'évolution de la biologie que la polémique identique conduite sur un plan plus abstrait par les philosophes ». (Ayala et Dobzhansky, 1972, p. 85).
- (9) On trouvera un exemple classique chez Weiss (1939).
- (10) P. ex. : Elsässer (1966, 1975) ; von Bertalanffy (1971).
- (11) Cf, par exemple, la discussion entre C.H. Waddington et R. Thom *in* Waddington (1969), p. 242.
- (12) Je reviendrai sur ce point dans le dernier chapitre.
- (13) Je reviendrai sur ce point dans la section 11.2.

CHAPITRE PREMIER

LES PROBLÈMES IRRÉSOLUS DE LA BIOLOGIE

1.1. Le cadre du succès

L'objectif de la recherche biologique mécaniste a été clairement exprimé il y a plus d'un siècle par T.H. Huxley qui en donnait la définition suivante :

« La physiologie zoologique est la doctrine des fonctions ou des actions des animaux. Elle considère les corps animaux comme des machines animées par diverses forces et produisant une certaine masse de travail exprimable par rapport aux forces ordinaires de la nature. L'objectif final de la physiologie est de déduire les faits de la morphologie d'une part, et ceux de l'écologie de l'autre à partir des lois des forces moléculaires de la matière. » (1)

Des idées préfigurent les développements ultérieurs de la physiologie, de la biochimie, de la biophysique, de la génétique et de la biologie moléculaire. Ces sciences ont, à bien des égards, remporté de brillants succès — et tout particulièrement la biologie moléculaire. La découverte de la structure de l'ADN, le déchiffrement du code génétique et l'élucidation du mécanisme de synthèse des protéines semblent être des confirmations éclatantes de la validité de l'approche mécaniste.

Les défenseurs modernes les plus acharnés et les plus influents de

la théorie mécaniste sont les biologistes moléculaires. Leurs exposés théoriques commencent bien souvent par un rejet des théories vitalistes et organicistes. Elles sont présentées comme des vestiges de croyances « primitives » appelées à s'éteindre au fil de la progression de la biologie. Voici comment se poursuit leur exposé : (2)

La nature chimique du matériau génétique, l'ADN, est désormais connue ainsi que le code génétique par lequel il encode la séquence d'acides aminés dans les protéines. On a compris le mécanisme de la synthèse des protéines. On a découvert la structure de nombreuses protéines. Toutes les enzymes sont des protéines, et elles catalysent les chaînes et les cycles complexes des réactions biochimiques qui constituent le métabolisme d'un organisme. Le métabolisme est contrôlé par un feedback biochimique et on connaît plusieurs mécanismes permettant de régulariser l'activité enzymique. Les protéines et les acides nucléiques s'assemblent spontanément pour former des structures telles que les virus et les ribosomes. Compte tenu de la gamme de propriétés des protéines et des propriétés des autres systèmes physico-chimiques tels que les membranes lipidiques, il est possible, en principe, d'expliquer entièrement les propriétés des cellules vivantes.

La clé des problèmes posés par la différenciation et le développement — sur lesquels nous avons peu de connaissances — est la compréhension du contrôle de la synthèse des protéines. Nous possédons une excellente compréhension de la manière selon laquelle est exercé le contrôle de la synthèse de certaines enzymes et protéines dans le cas de la bactérie *Escherischia coli*. Le contrôle de la synthèse protéique se déroule toutefois selon des mécanismes plus compliqués dans les organismes supérieurs ; mais nous ne devrions pas tarder à l'élucider. Par conséquent, la différenciation et le développement devraient être explicables en fonction d'une série d'« interrupteurs » manœuvrés chimiquement, qui « branchent » ou « débranchent » des gènes, ou des groupes de gènes.

Le processus d'adaptation des parties des organismes vivants aux fonctions de l'ensemble, et le déterminisme apparent de la structure et du comportement des organismes vivants, peuvent être expliqués par rapport à des mutations génétiques au hasard suivies par une sélection naturelle visant à retenir les gènes qui favorisent la capacité de l'organisme à survivre et à se reproduire, les mutations défavorables étant quant à elles éliminées. Ainsi, la théorie néo-darwinienne de l'évolution peut-elle justifier le déterminisme ; il est totalement

inutile de supposer l'intervention de quelques mystérieux « facteurs vitaux ».

Nous connaissons mal le fonctionnement du système nerveux central, mais en définitive les progrès de la biochimie, de la biophysique et de l'électro-physiologie devraient nous permettre de présenter ce que nous appelons l'esprit en termes de mécanismes physico-chimiques se déroulant dans le cerveau. Il est donc possible, en principe, d'expliquer les organismes vivants uniquement en termes de physique et de chimie. Notre ignorance actuelle face aux mécanismes du développement et au système nerveux central n'est imputable qu'à l'énorme complexité des problèmes ; mais désormais grâce aux nouveaux concepts puissants de la biologie moléculaire et aux programmes informatiques, nous pourrions aborder ces sujets mieux armés que jamais.

A la lumière des succès passés, cette conviction que *tous* les problèmes de la biologie pourront en définitive être résolus de manière mécanique est parfaitement compréhensible. Nous ne pouvons toutefois émettre une opinion sur les perspectives de la conception mécaniste en nous fondant uniquement sur une extrapolation historique ; nous devons aussi étudier soigneusement les problèmes non résolus par la biologie et les moyens dont nous disposons pour les résoudre.

1.2. Les problèmes de la morphogenèse

La morphogenèse biologique peut être définie comme « la naissance des formes caractéristiques et spécifiques chez les organismes vivants. » (3) La forme « naît » !, voilà le premier problème. Le développement est *épigénétique* : de nouvelles structures apparaissent qui ne peuvent être expliquées en fonction du développement ou de la croissance de structures présentes dans l'œuf dès l'origine.

Beaucoup de systèmes en développement sont capables de *régulation*, voilà le deuxième problème ; en d'autres termes, si l'on enlève (ou si l'on ajoute) une partie à un système en développement, ce système continue à se développer de manière à produire une structure plus ou moins normale. La démonstration classique de ce phénomène a été réalisée dans les années 1890 par H. Driesch qui a employé pour ce faire des embryons d'oursins. Lorsqu'on tuait l'une des cellules d'un très jeune embryon au « stade 2 blastomères (deux cellu-

les) », la cellule restante ne donnait pas naissance à un demi-oursin, mais à un oursin complet quoique plus petit. De même, des organismes plus petits mais complets se développaient après la destruction d'une, deux ou trois cellules de l'embryon au « stade 4 blastomères (quatre cellules) ». La fusion de deux jeunes embryons d'oursins engendrait inversement la production d'un oursin géant. (4)

On a démontré le fait de la régulation dans de nombreux systèmes en développement. Cette capacité se perd toutefois souvent lors des phases ultérieures du développement lorsque la « destinée » des différentes régions est déjà déterminée. Il n'en est pas moins vrai que les systèmes où la détermination se produit à un stade précoce — par exemple dans les embryons d'insectes — on assiste à une régulation après que l'œuf a été endommagé. (Fig. 1)

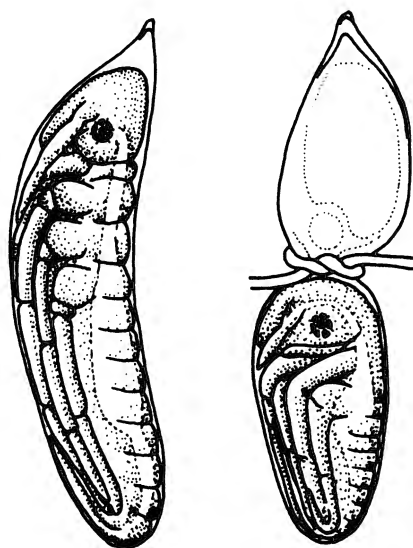


FIGURE N° 1 : Exemple de régulation. A gauche un embryon normal de libellule *Platynemis pennipes*. A droite un embryon plus petit mais complet ; il s'est développé à partir de la moitié postérieure d'un œuf ligaturé en son milieu immédiatement après la ponte (d'après Weiss, 1939).

Des résultats de ce genre montrent que les systèmes en développement progressent en fonction d'un objectif morphologique et qu'ils possèdent des propriétés qui déterminent cet objectif et leur permettent de l'atteindre même si des parties du système sont détruites et si le cours normal du développement est perturbé.

Le troisième problème est celui de la régénération, processus par lequel des organismes sont capables de remplacer ou de restaurer des structures endommagées. Les végétaux montrent une gamme étonnante de capacités régénératrices de même que de nombreux animaux inférieurs. Par exemple, si on coupe un ver en plusieurs morceaux, chaque morceau peut régénérer un ver complet. Beaucoup de vertébrés possèdent aussi des pouvoirs de régénération surprenants ; ainsi, si l'on prélève au moyen d'une intervention chirurgicale, le cristallin d'un triton, on remarquera qu'un nouveau cristallin se forme à partir du bord de l'iris (Fig. 2) ; lors du développement embryonnaire normal, le cristallin se forme d'une tout autre manière, à partir de la peau. Ce type de régénération fut découvert par G. Wolff qui a délibérément choisi une forme de mutilation qui n'aurait pu se produire accidentellement dans la nature ; il ne pouvait donc exister de sélection naturelle pour ce processus régénérateur particulier. (5)

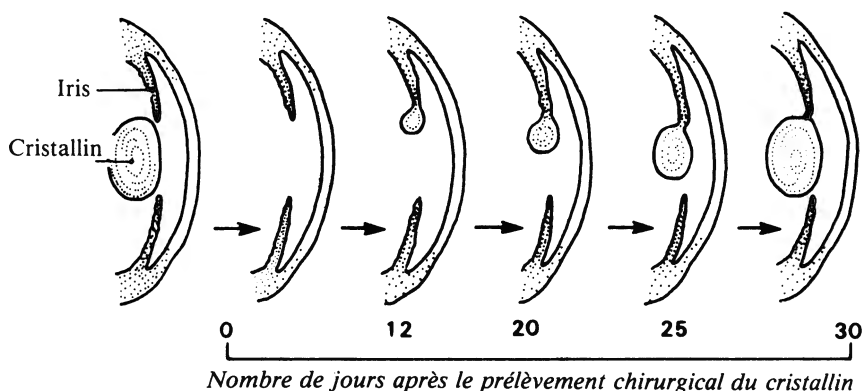


FIGURE N° 2 :

Régénération d'un cristallin à partir du bord de l'iris chez un triton dont le cristallin original a été prélevé au moyen d'une intervention chirurgicale. (cf Needham, 1942).

Le quatrième problème est posé par le simple fait de la reproduction : une partie « détachée » des parents devient un nouvel organisme ; une partie devient un tout.

Ces phénomènes ne peuvent être compris qu'en termes d'entités

causales qui sont en quelque sorte plus que la somme des parties des systèmes en développement, et qui déterminent les objectifs des processus de développement.

Les vitalistes attribuent ces propriétés aux *facteurs vitaux*, les organicistes aux *champs morphogénétiques* et les mécanistes aux *programmes génétiques*.

Le concept des programmes génétiques se fonde sur une analogie avec les programmes qui dirigent les activités des ordinateurs. Il implique que l'œuf fertilisé renferme un programme préformé qui détermine en quelque sorte les objectifs morphogénétiques de l'organisme et coordonne et contrôle son développement vers la réalisation de ces objectifs. Le programme génétique doit pourtant faire intervenir « quelque chose » de plus que la seule structure chimique de l'ADN, parce que des copies identiques d'ADN sont transmises dans toutes les cellules ; si toutes les cellules étaient programmées de manière identique, elles ne pourraient se développer différemment. Alors, qu'en est-il exactement ? On ne peut, pour répondre à cette question, que se perdre en de vagues suggestions quant à des interactions physico-chimiques structurées d'une certaine manière dans le temps et dans l'espace ; on n'a fait, en réalité, que reformuler le problème. (6)

Il est une autre difficulté sérieuse. Un programme est introduit dans un ordinateur par un être intelligent et conscient : le programmeur. Il est conçu et réalisé dans l'idée de remplir une tâche informatique précise. Dans la mesure où nous assimilons le programme génétique à un programme informatique, nous impliquons l'existence d'une entité directrice qui jouerait le rôle du programmeur. Si nous objectons maintenant que les programmes génétiques ne sont pas analogues aux programmes informatiques ordinaires mais à ceux d'ordinateurs auto-reproducteurs et auto-organisateurs, nous nous heurtons à un problème de taille : de tels ordinateurs n'existent pas. Et même s'ils existaient, ils auraient dû à l'origine être programmés de la manière la plus sophistiquée qui soit par leurs inventeurs. Le seul moyen de se sortir de ce dilemme est d'affirmer que le programme génétique a été construit en cours d'évolution par une combinaison de mutations au hasard et par sélection naturelle. Dès ce moment toute similitude avec un programme informatique disparaît et l'analogie perd tout son sens.

Les mécanistes orthodoxes rejettent l'idée d'un développement, d'une régulation ou d'une régénération apparemment téléodirigés

chez les organismes, suggérant ainsi qu'ils sont sous le contrôle d'un facteur vital. Mais tant que les explications mécanistes dépendront de concepts téléologiques tels que les programmes ou les instructions génétiques, on ne pourra expliquer le déterminisme des organismes qu'en admettant que leurs « objectifs » leur ont déjà été « dictés ». En réalité, les propriétés attribuées aux programmes génétiques sont remarquablement similaires à celles attribuées par les vitalistes à leurs hypothétiques facteurs vitaux ; le programme génétique semble, ironiquement, n'être qu'un facteur vital sous une enveloppe mécaniste.

Il va de soi que si la morphogenèse organique ne peut être expliquée d'une manière mécaniste rigoureuse à ce jour, il ne faut pas en déduire hâtivement qu'il en sera toujours ainsi. J'envisagerai dans le prochain chapitre les espoirs d'arriver à une telle explication, mais pour l'instant il est impossible d'avancer une réponse satisfaisante.

1.3. Le comportement

Si les problèmes posés par la morphogenèse sont d'une grande complexité, ceux posés par le comportement le sont plus encore. Il y a tout d'abord l'instinct. Demandons-nous, par exemple, comment des araignées parviennent à tisser des toiles sans jamais l'avoir appris d'autres araignées. (8) Ou considérons le comportement des coucous. Les jeunes sont couvés et élevés par des oiseaux d'autres espèces et ne voient jamais leurs parents. Vers la fin de l'été, les coucous adultes migrent vers leur habitat d'hiver en Afrique du Sud. Environ un mois plus tard, les jeunes coucous se rassemblent et s'envolent à leur tour vers cette région lointaine d'Afrique où ils se joindront à leurs aînés. (9) Ils savent instinctivement qu'ils doivent migrer et quand il convient de le faire ; ils reconnaissent instinctivement les autres jeunes coucous avec lesquels ils s'assemblent ; et tout aussi instinctivement ils savent quelle direction prendre et quelle destination atteindre.

Il y a ensuite le problème posé par les cas de régulation comportementale ; à savoir que si l'on modifie certaines parties des systèmes comportementaux on n'en obtient pas moins un résultat à peu près normal. Ainsi, un chien amputé d'une jambe régularise son activité motrice de façon à pouvoir marcher sur trois pattes. Un autre chien auquel on a prélevé une partie d'un hémisphère cérébral ne tardera pas à retrouver la plupart de ses aptitudes précédentes. Un troisième chien quant à lui se jouera d'obstacles placés arbitrairement sur son

chemin. Les trois chiens de nos exemples sont capables de se rendre là où ils le désirent malgré des perturbations de leurs organes moteurs, de leur système nerveux central ou de leur environnement.

Il y a troisièmement le problème de l'apprentissage et du comportement intelligent ; de nouveaux modes de comportement apparaissent qui ne peuvent apparemment être expliqués uniquement en termes de causes antérieures.

Un énorme fossé d'ignorance sépare ces phénomènes des faits établis de la biologie moléculaire, de la biochimie, de la génétique et de la neurophysiologie. Ainsi, comment expliquer le comportement migrateur des jeunes coucous en termes d'ADN et de synthèse protéique ? Il est évident qu'une explication satisfaisante demanderait plus qu'une simple démonstration du fait que des gènes appropriés contenant des séquences des bases dans l'ADN appropriées sont *nécessaires* à ce comportement, ou que celui-ci dépend d'impulsions électriques dans les nerfs. Il faudrait en outre comprendre les relations existant entre les séquences spécifiques de base dans l'ADN, le système nerveux des oiseaux et le comportement migrateur. A l'heure actuelle, cette relation ne peut être attribuée qu'aux mêmes entités intangibles qui « expliquent » les phénomènes de la morphogenèse : les facteurs vitaux, les champs morphogénétiques ou les programmes génétiques.

En outre, une compréhension du comportement présuppose une compréhension de la morphogenèse. Par exemple, même si l'on comprenait entièrement le comportement d'un animal inférieur relativement simple, tel un nématode, et qu'on puisse l'expliquer en termes de « branchement » et par rapport à la physiologie de son système nerveux, on n'aura toujours pas répondu à la question : comment le système nerveux avec son modèle caractéristique de « branchement » a-t-il été produit au cours du développement de l'animal ?

1.4. L'évolution

Bien avant la génétique mendélienne, de nombreuses variétés et espèces distinctes d'animaux domestiques et de végétaux ont été sélectionnées par élevage et par culture. Il n'y a aucune raison de douter du fait qu'un développement comparable des races et des espèces se produise dans la Nature sous l'influence d'une sélection naturelle plutôt qu'artificielle. Les néo-darwiniens prétendent expliquer ce type d'évolution en faisant référence à des mutations au

hasard, à la génétique mendélienne et à la sélection naturelle. Il faut toutefois reconnaître que même les partisans de la vision mécaniste n'acceptent pas tous l'idée que ce type de micro-évolution au sein d'une espèce explique l'origine des espèces elles-mêmes, ou des genres, ou des familles ou encore des divisions taxonomiques supérieures. Une école de pensée affirme que toute macro-évolution s'explique par des processus longtemps répétés de micro-évolution ; (10) l'autre école nie cette conception et prétend que des sauts importants se produisent brusquement en cours d'évolution. (11) Si les opinions des biologistes mécanistes diffèrent quant à l'importance relative des mutations à petite échelle (ou micro-évolution) ou de quelques unes à plus grande échelle au niveau de la macro-évolution, ils s'accordent généralement pour affirmer que ces mutations sont le fait du hasard et que l'évolution est explicable par une combinaison de mutation au hasard et de sélection naturelle.

Cette théorie ne pourra toutefois jamais être que spéculative. La preuve de l'évolution, fournie tout d'abord par les fossiles, restera toujours ouverte à une variété d'interprétations. Ainsi, les opposants à la théorie mécaniste peuvent-ils prétendre que les innovations évolutives ne sont pas entièrement explicables en termes d'événements au hasard mais sont dues à l'activité d'un principe créateur méconnu de la science mécaniste. Qui plus est, les pressions de la sélection qui découlent du comportement et des propriétés des organismes vivants eux-mêmes peuvent être considérées comme dépendantes d'un facteur organisateur interne, essentiellement non mécaniste.

Le problème de l'évolution ne peut donc être résolu d'une manière probante. Les théories vitalistes et organicistes impliquent forcément une extrapolation des idées vitalistes et organicistes, tout comme la théorie néo-darwinienne implique une extrapolation des idées mécanistes. Voilà qui est inévitable. L'évolution devra toujours être interprétée par rapport à des idées qui ont été forgées sur d'autres bases.

1.5. L'origine de la vie

Ce problème est tout aussi insoluble que celui de l'évolution, et ceci pour les mêmes raisons. Tout d'abord, il est impossible de savoir avec certitude ce qu'il s'est produit dans un passé lointain ; il y aura toujours pléthore de spéculations quant aux circonstances de l'origine de la vie sur terre. Parmi celles en vigueur à l'heure actuelle, notons l'origine terrestre de la vie dans une « soupe primitive » ;

l'infection de la terre par des micro-organismes envoyés de l'espace par des êtres intelligents venus d'une planète appartenant à un autre système solaire ; (12) et l'évolution de la vie sur des comètes contenant des matériaux organiques dérivés de poussière interstellaire. (13)

En outre, même si nous connaissions les conditions dans lesquelles la vie a vu le jour, cette information ne nous éclairerait en rien sur la nature de la vie. En supposant qu'il soit possible de démontrer, par exemple, que les premiers organismes vivants sont issus d'agrégats chimiques non vivants ou d'« hypercycles » de processus chimiques (14), dans une « soupe primitive », ceci ne prouverait pas qu'ils étaient entièrement mécanistes. Les organicistes pourraient toujours prétendre que de nouvelles propriétés organicistes sont apparues, et les vitalistes que le facteur vital est entré dans le premier système vivant au moment précis où il a vu le jour. Les mêmes arguments seraient valables si jamais les organismes vivants étaient synthétisés artificiellement, à partir de substances chimiques, dans une éprouvette.

1.6. Les limites de l'explication physique

La théorie mécaniste considère que tous les phénomènes de la vie, y compris chez l'homme, peuvent être expliqués, en principe, en termes de physique. En dehors des problèmes susceptibles de surgir des théories particulières de la physique moderne, ou des conflits les opposants entre elles, ce postulat est problématique pour — au moins — deux raisons fondamentales.

Tout d'abord, la théorie mécaniste ne serait valable que si le monde physique étaient causalement fermé. En ce qui concerne l'homme, ce serait le cas si les états mentaux n'avaient pas la moindre réalité, ou s'ils étaient d'une certaine manière identiques aux états physiques du corps, ou s'ils leur étaient parallèles ou encore s'ils n'en étaient que des épiphénomènes. En revanche, si l'esprit n'était pas physique et néanmoins causalement efficace, capable donc d'*interagir* avec le corps, le fonctionnement chez l'homme ne pourrait être entièrement expliqué en termes physiques. La possibilité que l'esprit et le corps interagissent n'est nullement écartée par les preuves disponibles : (15) pour l'instant, on ne peut prendre aucune décision définitive, s'appuyant sur des fondements empiriques en faveur soit de la théorie mécaniste, soit de la théorie interactionniste ; d'un point de

vue scientifique, la question demeure ouverte. Par conséquent, il est possible que le comportement humain, tout au moins, ne soit pas explicable entièrement en termes physiques, fût-ce en principe.

Ensuite, les efforts visant à expliquer l'activité mentale par rapport à la science physique débouchent sur un cercle vicieux apparemment inévitable, du fait que la science elle-même dépend d'une activité mentale. (16) Ce problème est devenu particulièrement évident en physique moderne lorsque a été établi le rôle de l'observateur dans les processus de mesure physique ; les principes de la physique « ne peuvent être formulés sans faire référence (bien que dans certaines versions celle-ci ne soit qu'implicite) aux impressions — et donc à l'esprit — des observateurs » (B. d'Espagnat). (17) En conséquence, la physique présupposant l'esprit des observateurs, cet esprit et ses propriétés ne peuvent être expliqués en termes de physique. (18)

1.7. La psychologie

En psychologie, la science de l'esprit, le problème de la relation entre l'esprit et le corps peut être évité en ignorant l'existence du « mental ». C'est en fait la démarche de l'école behavioriste qui restreint son attention au seul comportement objectivement observable. (19) Le behaviorisme n'en est pas pour autant une hypothèse scientifique vérifiable ; c'est une méthodologie. En tant qu'approche restrictive de la psychologie, son exactitude n'est nullement évidente. (20)

D'autres écoles de psychologie ont adopté la démarche plus directe consistant à accepter l'expérience subjective comme donnée primaire. Il n'est pas nécessaire, dans le cadre de notre discussion, d'envisager les différents systèmes et écoles. Un exemple suffira à montrer les difficultés biologiques soulevées par une hypothèse psychologique développée dans l'idée d'expliquer les observations empiriques. Les écoles psychanalytiques considèrent que de nombreux aspects du comportement et de l'expérience subjective dépendent de l'esprit subconscient ou inconscient. Afin d'expliquer les faits de l'expérience éveillée et des rêves, l'esprit inconscient doit posséder des propriétés totalement différentes de celles de n'importe quel système mécanique ou physique connu. C.G. Jung ne limite pas ce concept à l'esprit individuel, il suggère un substrat commun partagé par tous les esprits humains, l'inconscient collectif :

« Outre notre conscience immédiate, qui est de nature tout à fait personnelle et dont nous pensons qu'elle est la seule psyché empirique (même si nous y annexons accessoirement l'inconscient personnel), il existe un second système psychique de nature collective, universelle et impersonnelle, lequel est identique chez tous les hommes. Cet inconscient collectif ne se développe pas de manière individuelle, il est hérité. Il consiste en des formes préexistantes, les archétypes, qui ne peuvent devenir conscientes que secondairement et qui confèrent des formes définies à certains contenus psychiques. » (21)

Jung essaya d'expliquer l'hérédité de l'inconscient collectif en termes physiques, en suggérant que les formes archétypes étaient « présentes dans le plasma germinatif. » (22) Il paraît toutefois douteux que « quoi que ce soit » présentant les propriétés des formes archétypes puisse être hérité chimiquement de la structure de l'ADN, ou de toute autre structure physique ou chimique des cellules du sperme ou de l'ovule. En fait, l'idée de l'inconscient collectif n'a guère de sens par rapport à la biologie mécaniste actuelle et ce quels que puissent être ses mérites en tant que théorie psychologique.

Il n'y a *a priori* pas de raison pour que les théories psychologiques se confinent dans le cadre mécaniste ; elles risquent de mieux s'intégrer dans un cadre interactionniste. Les phénomènes mentaux ne dépendent pas nécessairement de lois physiques ; ils suivent plutôt des lois qui leur sont propres.

Pour illustrer la différence entre les démarches mécanistes et interactionnistes, intéressons-nous au problème de la *mémoire*. Selon la théorie mécaniste, les souvenirs doivent être stockés dans le cerveau. La théorie interactionniste considère que les propriétés de l'esprit peuvent être telles que les états mentaux passés sont capables d'influencer directement les états présents, et ceci d'une manière qui ne nécessite pas le stockage de traces physiques des souvenirs. (23) Si tel était le cas, une recherche de traces physiques de souvenirs dans le cerveau serait inévitablement vaine. Bien que différentes hypothèses mécanistes aient été avancées — par exemple en termes de circuits réfléchissant l'activité nerveuse, ou de modifications dans les jonctions synaptiques entre les nerfs, ou encore de molécules spécifiques d'ARN — aucune ne fournit une explication convaincante du mécanisme de la mémoire. (24)

Si les souvenirs ne sont pas stockés physiquement dans le cerveau,

certains types de souvenirs ne doivent pas nécessairement être confiés aux esprits individuels. La notion jungienne d'inconscient collectif héréditaire contenant des formes archétypes pourrait donc être interprétée comme une sorte de souvenir collectif.

De telles spéculations, défendables dans le contexte de l'interactionnisme, paraissent vides de sens d'un point de vue mécaniste. Nous ne pouvons toutefois considérer la théorie mécaniste comme un fait admis ; aujourd'hui, l'idée que tous les phénomènes de la psychologie sont en principe explicables en termes de physique n'est elle-même que pure spéculation.

1.8. La parapsychologie

Dans toutes les sociétés traditionnelles ainsi que dans les religions, il est question d'hommes et de femmes doués de pouvoirs apparemment miraculeux. Dans de nombreuses régions du monde, diverses aptitudes paranormales sont cultivées délibérément au sein de systèmes ésotériques tels que le chamanisme, la sorcellerie, le yoga tantrique et le spiritualisme. Même dans la société occidentale moderne, on a connaissance de phénomènes apparemment inexplicables : télépathie, clairvoyance, précognition, souvenirs de vies passées, maisons hantées, poltergeists, psychocynèse, etc.

Il est évident qu'il s'agit là d'un secteur où la superstition, la fraude et la crédulité sont reines. Il n'est toutefois pas permis de rejeter d'office la possibilité que de tels phénomènes existent ; nous devons au moins prendre le temps d'examiner les indices en notre possession.

L'étude scientifique des phénomènes dits paranormaux date maintenant de près d'un siècle. Bien que la recherche psychique ait fait ressortir que plusieurs cas étaient des fraudes manifestes et que d'autres avaient en réalité une cause normale, il en demeure encore beaucoup qui défient toute explication en termes de principes physiques connus. (25) En outre, des expériences conçues pour tester la validité des phénomènes de perception extra-sensorielle ou de psychocynèse ont produits des résultats positifs. (26)

Dans la mesure où ces phénomènes ne peuvent être expliqués par les lois connues de la physique et de la chimie, ils ne peuvent exister d'un point de vue mécaniste. (27) Mais ils existent pourtant et il semble y avoir deux types possibles de démarche théorique. La première consiste à supposer qu'ils dépendent de lois de physique encore

inconnues ; la seconde à supposer qu'ils dépendent de facteurs causals non-physiques ou de principes de liaison. (28) La plupart des hypothèses du second type avancées à ce jour se sont intégrées à un cadre interactionniste. D'autres, plus récentes, se fondent sur des formulations propres à la théorie quantique et font intervenir des « variables cachées » ou des « univers branchés » ; elles postulent en outre que le « mental » joue un rôle dans la détermination des résultats des processus probabilistes de changement physique. (29)

Tant l'imprécision de ces hypothèses théoriques que la nature insaisissable de ces phénomènes entravent les progrès réalisés par la recherche en parapsychologie. Ce qui à son tour renforce la tendance de nombreux biologistes mécanistes à ignorer, voire à nier, les indices prouvant que ces phénomènes se produisent bel et bien.

1.9. Conclusions

Ce bref survol des problèmes en suspens de la biologie ne nous encourage pas à penser qu'ils pourront tous être résolus par une approche exclusivement mécaniste. Dans le cas de la morphogenèse et du comportement animal, la question peut être considérée comme ouverte ; mais les problèmes de l'évolution et de l'origine de la vie sont insolubles *per se* et ne nous permettent pas de choisir entre la théorie mécaniste et les autres théories de la vie. La théorie mécaniste se heurte à de sérieuses difficultés philosophiques liées aux limites de l'explication physique. En psychologie elle n'a pas l'avantage sur la théorie interactionniste et lorsqu'il est question des phénomènes parapsychologiques, elle est en contradiction avec les preuves manifestes de leur réalité.

Par ailleurs, si l'approche interactionniste paraît être une alternative séduisante dans les domaines de la psychologie et de la parapsychologie, elle présente le grave inconvénient de creuser un fossé entre la psychologie et la physique. Qui plus est, ses implications biologiques plus vastes ne sont pas très claires. En effet, si l'interaction de l'esprit avec le corps affecte le comportement humain, qu'en est-il du comportement des autres animaux ? Et si un facteur causal non-physique intervient dans le contrôle du comportement des animaux, ne pourrait-il également jouer un rôle dans le contrôle de la morphogenèse ? En ce cas, doit-il être considéré comme un facteur du type proposé dans les théories vitalistes de la morphogenèse ? Si tel est le

cas, en quoi un facteur vital contrôlant le développement embryonnaire ressemblerait-il à l'esprit humain ?

Par conséquent, la théorie interactionniste, resituée dans le contexte biologique général, semble créer plus de problèmes théoriques qu'elle n'en résout et ne paraît pas déboucher sur des prédictions spécifiques véritables — en dehors du fait qu'elle permet de justifier les phénomènes parapsychologiques.

L'approche organiciste présente, au stade actuel, le même inconvénient : elle ne suggère aucune nouvelle ligne de recherche empirique ; elle n'a rien d'autre à offrir à la biologie expérimentale qu'une terminologie ambiguë.

Face à une telle pénurie d'alternatives, la recherche en biologie devra continuer à suivre l'approche mécaniste en dépit de ses limites. De cette manière au moins, on découvrira toujours *quelque chose* même si les problèmes majeurs de la biologie demeurent irrésolus. Si nous n'avons d'autre choix à court terme, il semble toutefois raisonnable en nous tournant vers l'avenir de nous demander s'il n'est pas possible de développer une alternative cohérente, spécifique et susceptible de produire des résultats vérifiables. Si une telle théorie doit être formulée, le problème de la morphogenèse me paraît être le problème idéal auquel s'attaquer pour commencer.

Je discuterai au chapitre suivant le potentiel des versions améliorées des théories mécanistes, vitalistes et organicistes de la morphogenèse.

NOTES

(1) Huxley (1867), p. 74.

(2) Cf, par exemple, Crick (1967) et Monod (1970). Ces deux auteurs prétendent, probablement avec raison, que leurs visions sont représentatives de celles de la majorité de leurs collègues. En réalité, la version de Crick, moins sophistiquée que celle de Monod, est probablement plus proche de la pensée de la plupart des biologistes moléculaires. Monod n'en propose pas moins l'exposé le plus clair et le plus explicite de la position mécaniste de ces dernières années.

(3) Needham (1942), p. 686.

(4) Driesch (1908).

(5) Wolff (1902).

(6) Un autre concept remplissant le même rôle explicatif que le programme génétique est le *génotype*. Bien que ce terme soit moins évidemment téléologique, il est souvent employé dans le même sens que le programme génétique. Lenartowicz (1975) a montré dans une analyse

détaillée que si le génotype était simplement identifié à l'ADN, sa valeur apparemment explicative disparaîtrait.

- (7) Pour une discussion plus détaillée, cf Sheldrake (1980 a).
- (8) On trouvera de nombreux exemples chez von Frisch (1975).
- (9) Ricard (1969).
- (10) P. ex. : Rensch (1959 ; Mayr (1963) ; Stebbins (1974).
- (11) P. ex. : Goldschmidt (1940) ; Willis (1940).
- (12) Crick et Orgel (1973).
- (13) Hoyle et Wickramasinghe (1978).
- (14) Eigen et Schuster (1979).
- (15) Cf, par exemple, les discussions de Beloff (1962) et de Popper et Eccles (1977).
- (16) Ce problème fut mis en évidence de manière particulièrement claire par Schopenhauer (1883).
- (17) D'Espagnat (1976), p. 286.
- (18) Wigner (1961, 1969).
- (19) P. ex. : Watson (1924) ; Skinner (1938) ; Broadbent (1961).
- (20) Pour des discussions critiques, cf Beloff (1962) ; Kœstler (1967) ; Popper et Eccles (1977).
- (21) Jung (1959), p. 43.
- (22) Ibid., p. 75.
- (23) Henri Bergson a développé une hypothèse originale et intéressante dans son ouvrage *Matière et Mémoire* (1896). Néanmoins, d'autres types d'hypothèses interactionnistes sont possibles ; par exemple, Beloff (1980) a suggéré que l'esprit interagit avec le cerveau dans le rétablissement de souvenirs, mais que les souvenirs eux-mêmes sont stockés sous forme de traces physiques.
- (24) Un récent article sur ce sujet commençait comme suit : « 'Où et comment le cerveau stocke-t-il ses souvenirs ? Tel est le grand mystère.' Cette citation extraite de l'ouvrage classique de Boring (1950) sur l'histoire de la psychologie expérimentale, est toujours valable de nos jours, bien qu'un quart de siècle de recherches intensives se soient passées. » (Buchtel et Berlucchi, in Duncan and Weston-Smith, 1977). Non seulement il n'existe aucune évidence de ce que des traces de souvenirs soient stockées dans le cerveau, mais encore il y a des raisons de croire qu'aucune explication mécaniste cohérente de la mémoire en termes de traces physiques ne soit possible, même en principe (Bursen, 1978).
- (25) Ashby (1972) propose une bibliographie critique couvrant presque tous les aspects de la recherche psychique : on trouvera des comptes rendus détaillés de la littérature chez Wolman (1977).
- (26) Pour un exposé introducteur, cf Thouless (1972).
- (27) Taylor et Balanovski (1979).
- (28) Pour un aperçu de la littérature théorique, cf Rao (1977).
- (29) P. ex. : Walker (1975) ; Whiteman (1977) ; Hasted (1978).

CHAPITRE 2

TROIS THÉORIES DE LA MORPHOGENÈSE

2.1. La recherche descriptive et la recherche expérimentale.

Il est possible de décrire le développement de diverses manières : on peut dessiner, photographier ou filmer la forme externe de l'animal ou du végétal — ce qui nous renseigne sur les modifications de sa morphologie ; on peut décrire sa structure interne, y compris son anatomie microscopique, à des stades de développement successifs (cf. Fig. 3) ; on peut mesurer les variations des grandeurs physiques telles que le poids, le volume et le taux de consommation d'oxygène ; on peut également analyser les modifications de la composition chimique de l'organisme dans son ensemble ou de certaines de ses parties. L'amélioration progressive des techniques a permis de réaliser de telles descriptions de manière toujours plus détaillée. Ainsi, grâce au microscope électronique, on a étudié l'ultrastructure cellulaire avec une résolution de loin supérieure à celle atteinte à l'aide du microscope optique : on a donc découvert un nombre considérable de structures nouvelles. Les méthodes analytiques de la biochimie moderne ont permis de mesurer dans de minuscules échantillons de tissus les modifications de concentration de molécules spécifiques telles que : les protéines et les acides nucléiques. Les radio-isotopes permettent de suivre et de localiser des structures chimiques au fur et à mesure du développement de l'organisme. Les techniques d'induction de modifications génériques au sein de certaines cellules de l'embryon permettent d'identifier leurs descendants « marqués » génétiquement et de dresser la carte de leur destinée.

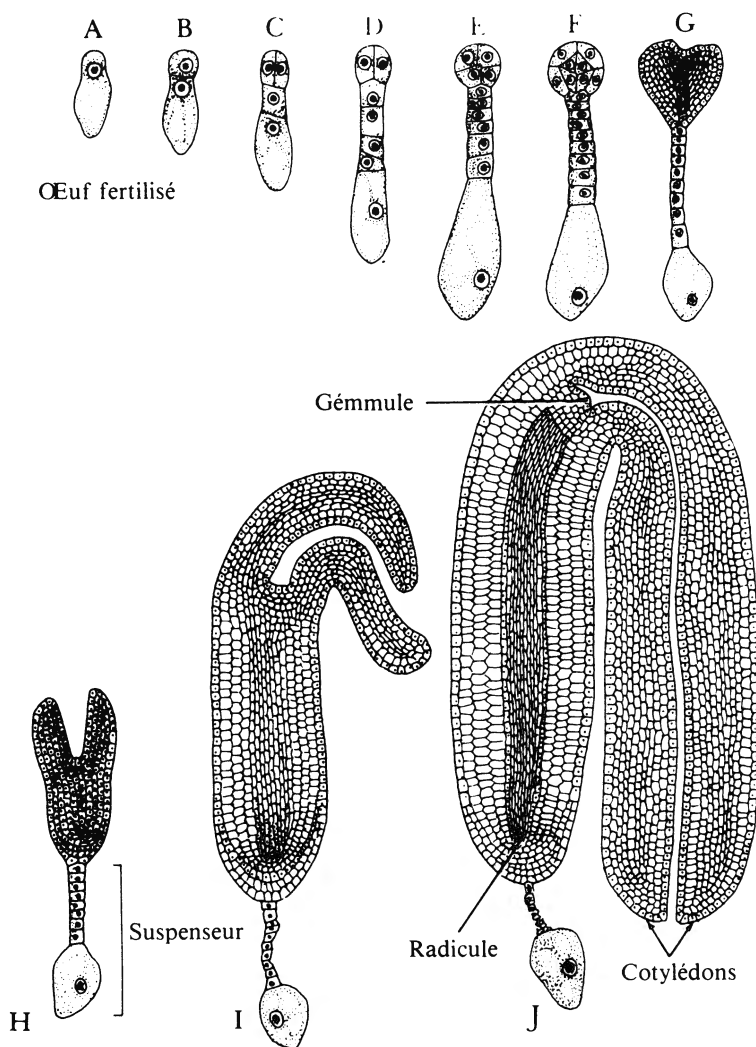


FIGURE N° 3 : Phases du développement de l'embryon de la « bourse-à-pasteur », *Capsella bursa-pastoris* (d'après Maheshwari, 1950).

La plupart des recherches en embryologie et en génétique visent à fournir des descriptions factuelles au moyen de telles techniques. Ces descriptions sont ensuite classifiées et comparées afin de découvrir de quelle manière diverses modifications sont liées au sein d'un organisme et en quoi divers organismes se ressemblent. Ces résultats purement descriptifs n'expliquent pas, *per se*, les causes du développement mais suggèrent certaines hypothèses (1). Ces dernières peuvent alors être étudiées en provoquant des perturbations expérimentales du processus de développement : on modifiera ainsi l'environnement ; on appliquera des stimuli physiques ou chimiques en certains points spécifiques de l'organisme et on étudiera indépendamment leur développement ; on observera parallèlement la manière dont l'organisme réagit au prélèvement ; on étudiera les effets obtenus en combinant diverses parties au moyen de greffes ou de transplantations.

Les problèmes majeurs soulevés par ce type de recherche ont été résumés dans la section 1.2. : le développement biologique est épigénétique — c'est-à-dire qu'il implique un accroissement de complexité de la forme et de l'organisation inexplicable en fonction du développement ou de la décomposition d'une structure préformée mais invisible ; nombre d'organismes en développement sont capables de régulation — c'est-à-dire de produire une structure plus ou moins normale si une partie de l'organisme est détruite ou prélevée à un stade du développement suffisamment précoce ; de nombreux organismes sont capables de régénérer ou de remplacer des parties manquantes ; et, dans la multiplication végétative ou dans la reproduction sexuelle, de nouveaux organismes sont formés à partir d'éléments provenant des organismes parentaux. Il convient en outre de noter que dans les systèmes en développement, la destinée des cellules et des tissus est déterminée par la position qu'ils occupent au sein de l'organisme.

Les théories mécanistes, vitalistes et organicistes se fondent, toutes trois, sur cet ensemble de faits et de résultats qu'aucune ne remet en question. Elles divergent en revanche radicalement dans leurs interprétations.

2.2. Le mécanisme

La théorie mécaniste moderne de la morphogenèse attribue un rôle primordial à l'ADN pour quatre raisons.

1° — On a découvert que de nombreuses différences héréditaires entre des animaux ou des végétaux d'une même espèce dépendent de gènes, dont on peut actuellement dresser la cartographie et localisés sur des sites précis de chromosome particulier.

2° — On sait que la base chimique des gènes est l'ADN et que leur spécificité dépend de la séquence des bases puriques et pyrimidiques dans l'ADN.

3° — On sait comment l'ADN agit en tant que base chimique de l'hérédité : d'une part, il est capable d'effectuer sa propre répllication du fait de la spécificité de l'appariement des bases sur ses deux brins complémentaires ; d'autre part, il sert de modèle pour la séquence des acides aminés dans les protéines. Il ne remplit pas ce dernier rôle de manière directe ; un de ses brins (un montant de la double hélice) est d'abord « transcrit » sous forme d'une molécule d'ARN « messenger » constitué par une chaîne polynucléotidique unique — au cours du processus de synthèse des protéines — la séquence des bases est « lue » à raison de trois bases à la fois. Différents triplets de bases spécifient différents acides aminés ; ainsi, le code génétique est-il « traduit » en une séquence d'acides aminés, liés ensemble pour donner des chaînes polypeptidiques caractéristiques, qui s'enroulent ensuite pour former les protéines.

4° — Les caractéristiques d'une cellule dépendent de ses protéines : son métabolisme, sa capacité de synthèse des enzymes, certaines de ses structures dues aux protéines de structure, et les propriétés de sa surface membranaires qui la rend reconnaissable par d'autres cellules dotées de protéines spéciales à leur surface.

Dans le cadre de la pensée mécaniste, le problème central du développement de la morphogenèse est celui du contrôle de la synthèse des protéines. Chez les bactéries, des substances chimiques spécifiques appelées « inducteurs » peuvent provoquer des transcriptions de régions spécifiques de l'ADN en ARN messenger, qui sert ensuite de modèles à des protéines spécifiques. L'exemple classique est l'induction de l'enzyme — galactosidase à partir du lactose chez *Escherischia coli*. Le « branchement » du gène est le siège d'un système complexe, comprenant une protéine répresseur qui bloque la transcription en se combinant à la région spécifique de l'ADN. Cette tendance est fortement réduite en présence de l'inducteur chimique. Les répresseurs chimiques spécifiques « débranchent » parfois les gènes par un processus analogue. Chez les animaux et chez les végétaux, le système qui « branche » ou qui « débranche » les gènes est

plus compliqué et n'est pas encore compris. De nouvelles complications résultent d'une découverte récente : l'ARN messager peut être formé d'éléments transcrits à partir de différentes régions de l'ADN est subséquentment assemblées d'une manière spécifique. Qui plus est, la synthèse des protéines est également contrôlée au « niveau de traduction » ; la synthèse des protéines peut être « branchée » ou « débranchée » par une série de facteurs, même en présence de l'ARN messager approprié.

Les différentes protéines produites par différents types de cellules dépendent de la manière dont est contrôlée la synthèse des protéines. La seule façon de comprendre cela dans un cadre mécaniste consiste à envisager des influences physico-chimiques sur les cellules ; les modes de différenciation dépendent donc des modes physico-chimiques au sein du tissu. On ne connaît pas la nature de ces influences, mais on n'en a pas moins avancé diverses possibilités : gradients de concentration d'agents chimiques spécifiques ; systèmes « diffusion-réaction » avec rétroaction chimique ; gradients électriques ; oscillations électriques ou chimiques ; contacts mécaniques entre les cellules ; ou divers autres facteurs ou combinaisons de différents facteurs. Les cellules sont alors contraintes de réagir à ces différences selon des manières caractéristiques. Une façon courante d'envisager ce problème est de considérer que ces facteurs physiques ou chimiques fournissent l'« information positionnelle » que les cellules « interprètent » ensuite en fonction de leur programme génétique en « branchant » la synthèse des protéines particulières. (2)

Ces divers aspects du problème central du contrôle de la synthèse des protéines sont à présent l'objet d'investigations actives. Nombre de biologistes mécanistes espèrent que la solution de ce problème fournira — ou tout au moins mènera vers — une explication de la morphogenèse en termes purement mécanistes.

Afin d'établir si une telle explication mécaniste est probable ou même possible un certain nombre de difficultés doivent être considérées une à une :

(1) Le rôle explicatif imputé à l'ADN et à la synthèse des protéines spécifiques est sérieusement restreint dans son champ d'action du fait que l'ADN comme les protéines de différentes espèces sont parfois très semblables. Par exemple, dans une comparaison détaillée entre des protéines humaines et celles d'un chimpanzé, on a découvert qu'un nombre considérable d'entre elles étaient identiques et que d'autres ne différaient que légèrement :

« La séquence des acides aminés, les méthodes immunologiques et électrophorétiques présentent des évaluations concordantes quant à la ressemblance génétique. Toutes ces approches indiquent que le polypeptide humain moyen est à plus de 99 % identique à sa contrepartie chez le chimpanzé. (3) Les comparaisons des parties considérées comme importantes sur le plan génétique des séquences d'ADN montrent que la différence globale entre les séquences ADN des humains et des chimpanzés n'est que de 1,1 %. Des comparaisons semblables entre différentes espèces de souris ou de mouches du vinaigre *Drosophila* ont révélé des différences *plus importantes* entre ces espèces très proches qu'entre les êtres humains et les chimpanzés et mènent à la conclusion que « les contrastes entre l'évolution des organismes et celui des molécules indiquent que les deux processus sont dans une large mesure indépendants l'un de l'autre. » (4)

Cependant, présumons pour le propos de l'argument que les différences héréditaires entre des espèces aussi différentes que les êtres humains et les chimpanzés puissent être vraiment expliquées en termes de très petits changements dans la structure moléculaire, ou de petits nombres de protéines différentes, ou de changements génétiques qui affectent le contrôle de la synthèse protéique (dépendant peut-être dans une certaine mesure des différences de l'ADN au sein des chromosomes) ou des combinaisons de ces facteurs.

(2) Au sein du même organisme, différents modèles de développement interviennent alors que l'ADN demeure le même. Considérons à ce propos le bras et la jambe d'un homme : tous deux contiennent des types de cellules identiques (cellules des muscles, cellules du tissu conjonctif, etc) ainsi que des protéines et un ADN identiques. Les différences existant entre le bras et la jambe ne peuvent donc être attribuées à l'ADN *per se* ; elles sont imputables aux facteurs déterminant les formes qui agissent différemment dans le développement du bras et de la jambe. La précision de l'organisation des tissus — par exemple, la réunion des tendons sur la partie droite des os — montre que ces facteurs déterminatifs jouissent d'une grande précision. La théorie mécaniste de la vie signifie que ces facteurs doivent être considérés comme étant de nature physico-chimique. Or leur nature est à l'heure actuelle inconnue.

(3) Même si les facteurs physiques ou chimiques déterminant un modèle de différenciation sont identifiables, il subsiste encore le pro-

blème de la manière dont ces facteurs se modèlent eux-mêmes en premier lieu. Ce problème peut être illustré en considérant deux des très rares cas dans lesquels des « morphogènes » chimiques ont vraiment été isolés.

Premièrement dans les myxomycètes cellulaires, des cellules amiboïdes vivant libres s'assemblent sous certaines conditions pour former un pseudoplasmode à l'aspect de limace, qui après s'être déplacé pendant un certain temps s'élève dans l'air et se différencie en un pédicelle porteur d'une masse de spores. (Fig. 4) On a montré que l'agrégat de ces cellules dépendait d'un agent chimique relativement simple, l'AMP cyclique (adénosine 3'-5'-monophosphate). Mais dans l'organisme composé, bien que la distribution de l'AMP cyclique soit en relation avec le mode de différenciation, « il est difficile de dire si le mode de l'AMP cyclique est une cause ou une conséquence de la différenciation des pédicelles et des pré-spores ». En outre, même s'il joue un rôle causal dans la différenciation, il n'explique pas en soi le mode dans lequel il est distribué, ni le fait que ce modèle varie d'une espèce à une autre : certains autres facteurs sont certainement responsables de sa distribution-type. (5)

Deuxièmement, chez les végétaux supérieurs, l'hormone auxine (acide β indolyl-acétique) est connue pour jouer un rôle dans le contrôle de la différenciation vasculaire. Mais qu'est-ce qui contrôle donc la production et la distribution d'auxine ? Il semble que la réponse soit : la différenciation vasculaire elle-même. L'auxine est probablement libérée par des cellules vasculaires différenciées en tant que sous-produits de la rupture protéique, qui advient lorsque les cellules mûrissent. Le système est donc circulaire : il contribue à maintenir les modèles de différenciation, mais il n'explique pas comment ils sont établis en premier lieu. (6)

Supposons cependant qu'il soit possible d'identifier quels facteurs confèrent un modèle aux influences physiques ou chimiques qui, à leur tour, déterminent le modèle de différenciation ; supposons également que les moyens par lesquels ces facteurs de contrôle sont eux-mêmes contrôlés puissent être identifiés, etc. Nous nous trouvons alors confrontés au problème de régulation : si on supprime une partie du système, ces séries élaborées de modèles physico-chimiques seront bouleversées. Mais d'une façon quelconque les parties restantes du système modifient le cours habituel de leur développement et produisent un résultat final plus ou moins normal.

On considère en général que ce problème est des plus complexes et

il est loin d'être compris, ne serait-ce que dans les grandes lignes. Les défenseurs de la théorie mécaniste espèrent qu'il sera résolu grâce à maints efforts acharnés ; leurs adversaires nient qu'il puisse être ainsi résolu, y compris dans le principe. Supposons encore une fois cependant qu'on parviendra à une solution mécaniste.

(4) Vient ensuite le problème de la façon dont cette « information positionnelle » produit ses effets. L'explication la plus simple serait que « l'information positionnelle » est déterminée par des gradients de concentration d'agent chimique spécifique et ces cellules exposées à plus d'une certaine concentration synthétisent tel ensemble de protéines tandis que des cellules exposées à des concentrations inférieures à ce seuil synthétisent tel autre ensemble de protéines. Supposons encore que ce mécanisme ou d'autres permettant d'interpréter l'« information positionnelle » soi(en)t identifiable(s). (7) A la fin de cette chaîne de suppositions des plus optimistes, nous obtenons une situation dans laquelle différentes cellules s'organisent selon un modèle adapté pour fabriquer différentes protéines.

Il y a eu jusqu'à présent un ensemble de relations interindividuelles : un stimulus spécifique à « branché » un gène ; l'ADN est transcrit en ARN ; et l'ARN est traduit en une séquence particulière d'acides aminés, une chaîne polypeptidique. Cette séquence causale simple touche maintenant à sa fin. Comment les chaînes polypeptidiques s'enroulent-elles dans les structures tridimensionnelles caractéristiques des protéines ? Comment les protéines confèrent-elles aux cellules leurs structures caractéristiques ? Comment les cellules s'assemblent-elles pour former des tissus possédant des structures caractéristiques ? Etc. Tels sont les problèmes de la morphogenèse : la synthèse des chaînes polypeptidiques spécifiques fournit la base pour le mécanisme métabolique et les matériaux structurels desquels dépend la morphogenèse. Les chaînes polypeptidiques et les protéines dans lesquelles elles s'enroulent sont sans aucun doute nécessaires à la morphogenèse ; mais qu'est-ce qui détermine vraiment les modèles et les structures dans lesquels les protéines, les cellules et les tissus se combinent ? L'hypothèse mécaniste veut que ceci soit explicable en termes d'interaction physique et se déroule spontanément en donnant les bonnes protéines aux bonnes places, aux bons moments et dans la bonne séquence. La biologie mécaniste abdique effectivement à ce stade crucial et le problème de la morphogenèse est abandonné sans autre forme de procès à la physique.

Il est vrai que les chaînes polypeptidiques s'enroulent spontanément

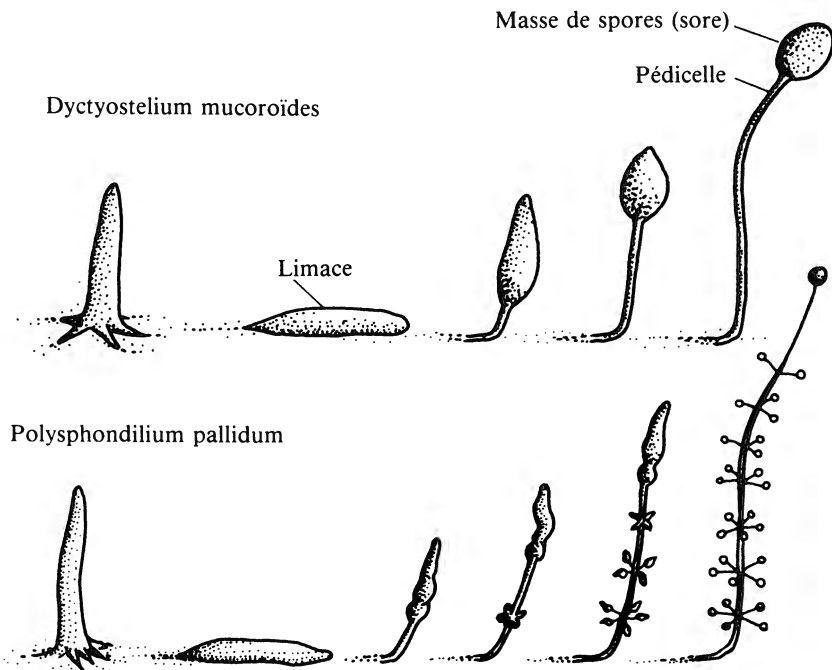


FIGURE N° 4 — Stades de migration et de culmination de deux espèces de myxomycètes cellulaires. Sur la gauche se trouvent les organismes composés, récemment développés et formés par l'agrégat de nombreuses cellules amiboïdes. Ceux-ci se déplacent comme des limaces, puis croissent en hauteur en se différenciant en des pédicelles porteurs de spores (d'après Bonner, 1958).

ment en de bonnes conditions en protéines ayant une structure tridimensionnelle caractéristique. On parvient même à les faire se dérouler, puis en changeant les conditions, s'enrouler à nouveau dans des tubes à essai. Ce processus ne dépend donc pas d'une quelconque propriété mystérieuse des cellules vivantes. Des sous-unités protéiques s'assemblent en outre dans des conditions de laboratoire pour former des structures qui sont normalement produites à l'intérieur des cellules vivantes : par exemple, des sous-unités nommées tubulines s'assemblent en des structures ressemblant à de longs bâtonnets nommés microtubules. Des structures encore plus complexes, tels que des ribosomes peuvent être formées par l'agrégation spontanée de protéines diverses et de composants de l'ARN. D'autres classes de substances, par exemple les lipides des membranes cellulaires peuvent aussi s'assembler spontanément dans un tube à essai.

Ces structures ressemblent à des cristaux puisqu'au stade actuel elles subissent un auto-assemblage spontané ; nombre d'entre elles peuvent vraiment être considérées comme cristallines ou quasi-cristallines. Elles ne posent donc en principe ni plus ni moins problème qu'une cristallisation normale ; on présume que des processus physiques de même type sont mis en œuvre.

Néanmoins, on ne peut en aucun cas considérer tous les processus morphogénétiques comme des types de cristallisation. Ils doivent impliquer un certain nombre d'autres facteurs physiques ; par exemple les formes prises par des membranes doivent être influencées par les forces de tension en surface, et les structures des gels et des solutions par les propriétés colloïdales de leurs constituants. Certains des modèles émanent donc parfois de variations dues au hasard sur le plan statistique. Des exemples simples de la manifestation d'«ordre à travers les fluctuations » sont actuellement à l'étude selon le point de vue de la thermodynamique irréversible ou non équilibrée dans les systèmes inorganiques, et il est possible que des processus comparables œuvrent dans les cellules et les tissus. (9)

La théorie mécaniste ne suggère cependant pas simplement que ces processus physiques, et d'autres encore, participent à la morphogenèse ; elle affirme que la morphogenèse est explicable en termes de physique. Qu'est-ce que cela signifie ? Si toute chose observable est *définie* comme étant en principe explicable physiquement du simple fait qu'elle advienne, elle est donc par définition. Ceci ne signifie toutefois pas qu'elle soit explicable en termes de lois physiques *connues*. Une telle explication pourrait être valablement formulée à propos de la morphogenèse biologique si un biologiste, disposant de la séquence entière des bases dans l'ADN d'un organisme et d'une description détaillée de l'état physico-chimique de l'œuf fertilisé et de l'environnement dans lequel il s'est développé, pouvait *prédire* selon les lois fondamentales de la physique (par la théorie des quantas, les équations de l'électromagnétisme, le deuxième principe de la thermodynamique, etc) : premièrement, la structure tridimensionnelle de toutes les protéines que l'organisme produira ; deuxièmement, les propriétés enzymatiques et autres de ces protéines ; troisièmement, le métabolisme entier de l'organisme ; quatrièmement, la nature et les conséquences de tous les types d'information positionnelle qui se manifesteront durant son développement ; cinquièmement, la structure de ces cellules, tissus et organes et la forme de l'organisme en tant que tout ; et finalement dans le cas d'un animal, son comporte-

ment instinctif. Si toutes ces prévisions étaient confirmées et si en outre le déroulement du processus de régulation et de régénération pouvait également être prévu *a priori*, il s'agirait vraiment d'une démonstration concluante du fait que les organismes vivants sont totalement explicables en termes de lois physiques connues. Mais il est évident que ceci est impossible en l'état actuel de nos connaissances. Il n'existe donc aucun moyen de démontrer la validité d'une telle explication. Et il n'en existera peut-être jamais.

Ainsi si la théorie mécaniste prétend que tous les phénomènes de la morphogenèse sont en principe explicables selon les lois connues de la physique, il se pourrait que cela soit faux : nous comprenons si peu de choses à présent qu'il semble qu'il n'existe aucun fondement pour étayer la croyance en la capacité des lois connues d'expliquer tous les phénomènes. Il s'agit toutefois d'une théorie vérifiable qui pourrait être réfutée par la découverte de nouvelles lois de la physique. La théorie mécaniste serait irréfutable si elle affirmait que les organismes vivants obéissent tant à des lois connues qu'inconnues. Elle serait alors une simple déclaration de confiance dans la possibilité d'explication. Elle ne s'opposerait ni à l'organicisme ni au vitalisme, elle les inclurait.

En pratique, la théorie mécaniste de la vie n'est pas considérée comme une théorie scientifique réfutable et rigoureusement définie ; elle sert plutôt à fournir une justification à la méthode conservatrice de travail dans le cadre de pensée établi, offert par la physique et la chimie actuelles. La théorie mécaniste de la vie serait facilement modifiable pour inclure la découverte d'une nouvelle loi de physique, en dépit de la compréhension générale qu'on lui attribue. Que cette théorie modifiée de la vie soit dite mécaniste ou non importe peu, il ne s'agit alors que d'une question de définition.

Attendu que de nombreuses inconnues subsistent quant aux phénomènes de la morphogenèse et de son développement au fonctionnement, on ne saurait écarter la possibilité que certains d'entre eux au moins dépendent d'un facteur causal non encore reconnu par la physique. Cette question est simplement écartée dans l'approche mécaniste mais elle demeure néanmoins en suspens.

2.3. Le vitalisme

Le vitalisme affirme que le phénomène de la vie ne peut être entiè-

rement compris en termes de lois physiques dérivées essentiellement de l'étude de systèmes inorganiques, mais qu'un facteur causal supplémentaire œuvre dans les organismes vivants. Une déclaration caractéristique de la position vitaliste du XIX^e siècle est due au chimiste Liebig (1844) : il prétendit qu'en dépit du fait que les chimistes produisaient déjà toutes sortes de substances organiques, et qu'ils en produiraient encore plus à l'avenir, la chimie ne serait jamais capable de créer un œil ou une feuille. En outre, aux causes reconnues de chaleur, d'affinité chimique et à la force formative de cohésion et de cristallisation « dans les corps vivants s'ajoutent une quatrième cause qui domine la force de cohésion et combine les éléments en des formes nouvelles de sorte qu'ils acquièrent de nouvelles qualités : formes et qualités qui n'apparaissent pas, excepté dans l'organisme ». (10)

De telles idées, bien que très répandues, étaient trop vagues pour fournir une alternative satisfaisante à la théorie mécaniste. Ce n'est qu'au début de ce siècle que des théories néo-vitalistes ont été élaborées en détail. La plus importante par rapport à la morphogenèse était celle de l'embryologiste Hans Driesch. C'est cette dernière qui fournirait son meilleur fondement à une théorie vitaliste moderne.

Driesch ne niait pas que nombre de traits des organismes vivants étaient compréhensibles en termes physico-chimiques. Il avait connaissance des découvertes de la physiologie et de la biochimie et était conscient de leur potentiel pour les découvertes futures : « Il y a de nombreux composés chimiques spécifiques présents dans l'organisme, appartenant aux différentes classes du système chimique et dont la constitution est en partie connue, en partie inconnue. Mais ceux qui ne sont pas encore connus le seront probablement dans un futur très proche et aucune impossibilité théorique n'existe quant à la découverte de la composition de l'albumine (protéine) et quant à la manière d'en " fabriquer ". » (11) Il savait que les enzymes (« ferments ») catalysaient des réactions biochimiques et pouvaient le faire dans des conditions de laboratoire : « Aucune objection n'existe quant à la conception voulant que presque tous les processus métaboliques de l'organisme soient dus à l'intervention de ferments ou d'agents catalyseurs, et la seule différence entre des ferments inorganiques et organiques réside dans le caractère hautement sophistiqué des seconds et dans leur très haut degré de spécification. » (12) Il savait que les gènes de Mendel étaient des entités matérielles situées dans les chromosomes, et qu'ils étaient probable-

ment des composés chimiques de structure spécifique. (13) Il pensait que maints aspects de la régulation métabolique et de l'adaptation physiologique étaient compréhensibles selon une optique physico-chimique (14) et estimait qu'il y avait en général « de nombreux processus dans l'organisme... qui se déroulaient d'une manière téléologique ou pré-déterminée sur une base mécanique. » (15) Ses opinions sur ces sujets ont été confirmées par les progrès subséquents de la physiologie, de la biochimie et de la biologie moléculaire. Il est évident que Driesch était incapable d'anticiper les détails de ces découvertes, mais il les considérait comme possibles et en aucune façon incompatibles avec le vitalisme.

En ce qui concerne la morphogenèse, il considérait que : « On devrait admettre qu'une machine, au sens propre du terme, pourrait être la force motrice de l'organogenèse en général si seulement un développement normal, c'est-à-dire non-perturbé, existait et si en supprimant certaines parties de notre système, nous obtenions un développement fragmentaire ». (16) Mais en fait, dans de nombreux systèmes embryonnaires, à la suppression de certaines parties de l'embryon succède un processus de régulation au cours duquel les tissus restants se réorganisent et continuent à produire un organisme adulte de forme plus ou moins normale.

La théorie mécaniste doit s'efforcer de prendre en compte le développement en termes d'interactions complexes physico-chimiques entre les parties de l'embryon. Driesch prétendait que le fait de la régulation rendait inconcevable un tel système mécanique parce que le système était capable de demeurer un tout et de produire un résultat final typique alors qu'aucun système mécanique tridimensionnel complexe ne demeure un tout après le retrait arbitraire de l'une ou l'autre de ses parties.

Rien n'interdit d'objecter à cela que les progrès technologiques contredisent cette hypothèse ou la contrediront dans un futur proche. Mais il ne semble pas qu'elle ait été réfutée jusqu'à présent. Par exemple, bien que des systèmes cybernétiques réagissent de manière appropriée à certains types de perturbation fonctionnelle, ils ne le font que sur la base d'une structure définie. Ils sont incapables de régénérer leur propre structure physique. Ainsi si des parties de l'ordinateur étaient détruites par hasard, la machine elle-même ne pourrait pas les remplacer et le système ne pourrait continuer à fonctionner normalement après le retrait arbitraire des parties. L'hologramme constitue une autre illustration de la technologie moderne

qui présente quelque valeur. Rien n'interdit en effet de supprimer des pièces de celui-ci, il n'en continuera pas moins à donner naissance à une structure tridimensionnelle complète. Cependant l'hologramme ne se comporte ainsi que lorsqu'il fait partie d'un tout fonctionnel plus grand, incluant un laser, des miroirs, etc. Ces structures ne peuvent être régénérées après avoir subi des dommages arbitraires, par exemple si le laser est détruit.

Driesch pensait que les phénomènes de régulation, de régénération et de production montraient qu'il existait quelque chose dans les organismes vivants qui demeurait un tout même si des parties du tout physique étaient supprimées ; cela agissait *sur* le système physique mais n'en faisait pas partie intégrante. Il nomma ce facteur causal non-physique *entéléchie*. Il postula que l'entéléchie organisait et contrôlait les processus physico-chimiques durant la morphogenèse ; les gènes étaient responsables de la fourniture des *moyens* matériels de la morphogenèse — les substances chimiques à ordonner — mais l'entéléchie produisait l'agencement lui-même. Il est évident que la morphogenèse pourrait être affectée par des changements génétiques qui modifieraient sa finalité, mais cela ne prouverait pas qu'elle serait *expliquée* en termes de gènes ou d'agents chimiques auxquels ils ont donné naissance. De la même manière, le système nerveux fournissait les moyens pour les actions d'un animal, mais l'entéléchie organisait l'activité du cerveau, l'utilisant comme un instrument, comme un pianiste joue sur un piano. Le comportement pourrait être affecté par un dommage au cerveau exactement comme la musique jouée par le pianiste serait affectée par un dommage au piano. Cela prouverait simplement que le cerveau est un moyen nécessaire au comportement, comme le piano l'est au pianiste.

L'entéléchie est un mot d'origine grecque qui désigne un phénomène comportant en lui-même sa fin et son objectif ; elle renferme le dessein vers lequel tend un système sous son contrôle. En conséquence, si le déroulement normal du développement est perturbé, le système atteindra néanmoins le même objectif mais d'une manière différente. Driesch considérait que le développement et que le comportement étaient sous le contrôle d'une hiérarchie d'entéléchies, qui se trouvaient toutes dérivées de — et subordonnées à — l'entéléchie globale de l'organisme. (17) Comme dans n'importe quel système hiérarchique, tel qu'une armée, des erreurs étaient possibles et des entéléchies étaient susceptibles de se comporter de « manière

aberrante », comme elles le font en cas de super-régénération, en produisant un organe superflu.. (18) Mais de telles aberrations ne nient pas l'existence de l'entéléchie pas plus que les erreurs militaires nient que les soldats soient des êtres humains.

Driesch décrit l'entéléchie comme une « multiplicité intensive », un facteur causal non-spatial qui agit néanmoins sur l'espace. Il souligne que c'était un facteur naturel (opposé à métaphysique ou mystique) qui agissait sur les processus physico-chimiques. Ce n'était pas une forme d'énergie et son action ne contredisait pas le second principe de thermodynamique ou la loi de conservation de l'énergie. Alors comment fonctionnait-elle ?

Driesch écrivait durant l'ère de la physique classique à une époque où on pensait en général que tous les processus physiques étaient déterministes, en principe tout à fait prévisibles en termes d'énergie, de force vive, etc. Mais il considérait qu'il était impossible que les processus physiques soient entièrement déterminés puisque dans un tel cas l'entéléchie non-énergétique n'aurait pu agir sur eux. Il conclut donc — au moins en ce qui concerne les êtres vivants — que des processus microphysiques n'étaient pas tout à fait déterminés par la causalité physique, bien que les modifications physico-chimiques obéissent en général à des lois statistiques. Il suggéra que l'entéléchie agissait en affectant le timing détaillé des processus microphysiques, en les « suspendant » et en les libérant de leur « suspension » aussi souvent que ses desseins le requéraient :

« Cette faculté d'une suspension temporaire d'un devenir inorganique doit être considérée comme la caractéristique ontologique la plus essentielle de l'entéléchie... L'entéléchie, selon notre vision, est tout à fait incapable d'empêcher n'importe quel obstacle de se manifester... puisqu'une telle suppression requerrait de l'énergie, et que l'entéléchie est non-énergétique. Nous admettons seulement que l'entéléchie peut libérer dans la réalité ce qu'elle a *elle-même* rendu impossible, ce qu'elle a suspendu. » (19)

Cette proposition téméraire d'un indéterminisme physique dans les organismes vivants semble inacceptable du point de vue de la physique classique déterministe, mais à la lumière de la théorie quantique son audace est moindre. Heisenberg émit le principe d'incertitude en 1927 et il devint rapidement évident que les posi-

tions et les timings d'événements microphysiques n'étaient prévisibles qu'en termes de probabilités. En 1928, le physicien Sir Arthur Eddington était capable de spéculer que l'esprit influence le corps en affectant la configuration des événements quantiques dans le cerveau via l'influence causale quant à la probabilité de leur occurrence. « A moins de dénoncer son nom, la probabilité peut être modifiée d'une manière que les entités physiques ordinaires n'admettraient pas ». (20) Des idées comparables ont été proposées par le neurophysiologiste Sir John Eccles, qui résuma ainsi sa suggestion :

« L'hypothèse neurophysiologique stipule que la « volonté » modifie l'activité spatio-temporelle du réseau neuronal en exerçant un « champ d'influence » spatio-temporel qui produit un effet grâce à cette fonction unique détectrice du cortex cérébral actif. On remarquera que la « volonté » ou « influence de l'esprit » possède en soi quelque caractère doté d'une représentation spatio-temporelle afin de lui conférer cette efficacité opérationnelle. » (21)

Des physiciens et des parapsychologues ont récemment avancé un certain nombre d'hypothèses semblables mais plus détaillées (22) (cf section 1.8.).

Une théorie vitaliste moderne se fonderait sur l'hypothèse selon laquelle l'entéléchie, pour utiliser la terminologie de Driesch, commande des systèmes physico-chimiques en influençant physiquement des événements indéterminés dans les limites statistiques établies par la causalité énergétique. Pour ce faire, elle devrait elle-même posséder une représentation spatio-temporelle.

Mais comment l'entéléchie acquiert-elle ce caractère particulier ? La théorie interactionniste de la mémoire (cf section 1.7) suggère une réponse éventuelle. Si des souvenirs ne sont pas emmagasinés physiquement dans le cerveau, mais impliqués d'une quelconque façon dans une action directe à travers le temps (23), il n'est alors pas nécessaire qu'ils concernent exclusivement les cerveaux individuels ; ils pourraient être transmissibles d'une personne à une autre, ou une sorte de « banque de mémoire » pourrait être héritée d'innombrables individus ayant vécu antérieurement.

Ces idées peuvent être étendues jusqu'à inclure les instincts des animaux. Ces instincts seraient hérités de la mémoire collective de

l'espèce. Un instinct serait en quelque sorte une habitude acquise non par des individus mais par l'espèce en tant que tout.

Un certain nombre d'auteurs ont déjà proposé de telles idées (24) ; par exemple, le parapsychologue W. Carrington a suggéré que le comportement instinctif tel que le tissage d'une toile d'araignée « serait dû au fait que la créature individuelle (l'araignée) est en relation avec un système plus vaste (ou inconscient commun), dans lequel seraient emmagasinées toutes les expériences de tissage de toiles de l'espèce ». (25) Le zoologue Sir Alister Hardy a développé cette idée en suggérant que cette expérience partagée agissait en tant qu'« empreinte psychique » :

« Il existerait deux courants parallèles d'information : le code ADN, qui fournit la forme physique mouvante du courant organique sur lequel agit la sélection, et le courant psychique de l'expérience partagée, l'empreinte subconsciente de l'espèce, qui en interaction avec l'environnement sélectionnerait les membres de la population les plus aptes à perpétuer la race. » (26)

Dans ces suggestions, le type d'héritage dépendant d'un procédé non physique analogue à une mémoire se limite au domaine du comportement. Une plus ample généralisation de cette idée pour inclure l'héritage de la forme la mettrait en contact avec le concept de l'entéléchie de Driesch : le modèle caractéristique imposé à un système physico-chimique par l'entéléchie dépendrait de l'agencement spatio-temporel de l'entéléchie elle-même par une sorte de processus de mémoire. L'embryon d'un oursin se développera comme il le doit parce que son entéléchie renferme la « mémoire » du processus de développement de tous les oursins précédents ; en outre la « mémoire » des formes larvaire et adulte de ceux-ci permettra à l'entéléchie de diriger le développement vers ses objectifs normaux même si l'embryon a été blessé, compte tenu de la régulation.

On pourrait résumer ainsi une théorie vitaliste acceptable de la morphogenèse : l'héritage génétique de l'ADN détermine toutes les protéines que l'organisme fabrique. Mais l'organisation des cellules, des tissus et des organes, et la coordination du développement de l'organisme en tant que *tout* est déterminée par l'entéléchie. Cette dernière est héritée de manière immatérielle des membres précédents de la même espèce ; il ne s'agit ni d'un type de matière ni d'un type

d'énergie bien qu'elle affecte les systèmes physico-chimiques de l'organisme placés sous son contrôle. Cette action est possible parce que l'entéléchie se comporte comme un ensemble de « variables cachées » qui influence des processus probabilistes.

Cette théorie n'est en aucun cas vide de sens, et l'expérience permettrait probablement de la vérifier, mais elle semble insatisfaisante du simple fait qu'elle est vitaliste. L'entéléchie est par définition essentiellement non-physique. Même si elle influence *ex hypothesi* des systèmes matériels en fournissant un ensemble de variables, qui du point de vue de la physique quantique sont cachées, il s'agit encore d'une action du dissemblable sur le dissemblable. Le monde physique et l'entéléchie non-physique ne pourront jamais être expliqués ou compris l'un par rapport à l'autre.

Ce dualisme, inhérent à toutes les théories vitalistes, semble arbitraire à la lumière des découvertes de la biologie moléculaire de l'« auto-assemblage » de structures aussi complexes que les ribosomes et que les virus, indiquant une différence de degrés et non de type depuis la cristallisation. Bien que l'auto-organisation des organismes vivants soit dans l'ensemble plus complexe que celles des ribosomes et des virus et génère une plus grande hétérogénéité interne, il existe suffisamment de similitude pour suggérer que là encore réside une différence dans le degré d'organisation. Quoi qu'il en soit, c'est ce que les mécanistes et les organicistes préfèrent penser.

Il serait possible d'accepter une théorie vitaliste si aucune autre explication satisfaisante du phénomène de la vie n'était concevable. Durant la première partie de ce siècle, alors que le vitalisme semblait être la seule alternative à la théorie mécaniste, elle acquit une audience considérable en dépit de son dualisme essentiel. Mais le développement de la théorie organiciste durant les cinquante dernières années a fourni une autre possibilité qui, en incorporant divers aspects du vitalisme dans une vaste perspective, l'a effectivement supplanté.

2.4. L'organicisme

Les théories organicistes se sont développées sous des influences diverses : certaines issues de systèmes philosophiques, en particulier celle de A.N. Whitehead et J.C. Smuts ; certaines de la physique moderne, en particulier du concept de champs ; d'autres issues de la

Gestalt-thérapie (psychologie), elle-même très influencée par le concept des champs physiques ; et d'autres encore du vitalisme de Driesch. (27) Ces théories traitent des problèmes dont Driesch affirmait qu'ils étaient insolubles en termes mécanistes — régulation, régénération et reproduction — mais alors que Driesch proposa l'entéléchie non-physique pour justifier les propriétés de la globalité et de la directionalité présentées par les organismes en développement, les organicistes proposèrent les *champs* morphogénétiques (ou embryonnaires ou développementaux).

Cette idée fut avancée d'une part par A. Gurwitsch en 1922 (28) et d'autre part, par P. Weiss en 1926. (29) Cependant, hormis le fait de déclarer que les champs morphogénétiques jouaient un rôle important dans le contrôle de la morphogenèse, aucun de ces auteurs ne spécifia ce qu'ils étaient ou comment ils fonctionnaient. La terminologie du champ fut bientôt reprise par d'autres biologistes du développement, mais elle demeura mal définie bien qu'elle servît à suggérer des analogies entre des propriétés des organismes vivants et des systèmes électro-magnétiques inorganiques. Ainsi, si on coupe un aimant en deux parties, les deux aimants obtenus possèdent les propriétés du champ magnétique. De la même manière on supposait que le champ morphogénétique justifiait la « globalité » des parties séparées des organismes qui étaient capables de croître en de nouveaux organismes.

C.H. Waddington suggéra une extension de l'idée de champ morphogénétique pour prendre en compte l'aspect temporel du développement. Il nomma ce nouveau concept *chréode* (du grec Chré, c'est

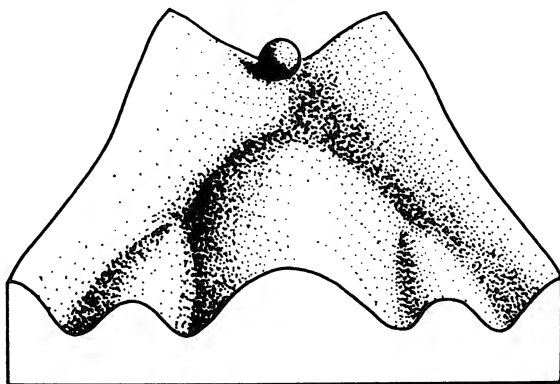


FIGURE N° 5 : Partie d'un « paysage épigénétique », illustrant le concept de la chréode en tant que canal de changement. (Extrait de Waddington, 1957. Reproduit grâce à la courtoisie de George Allen & Unwin, Ltd).

nécessaire, et *odos*, route ou chemin) et l'illustra au moyen d'un simple « paysage épigénétique » tridimensionnel. (Fig. 5) (30)

Dans ce modèle, le chemin suivi par la balle lorsqu'elle roule vers le bas correspond à l'histoire du développement d'une partie spécifique d'un œuf. Comme l'embryologie se poursuit, il y a une série de voies alternatives qui sont représentées par les vallées. Cela correspond aux itinéraires de développement des différents types d'organes, de tissus et de cellules. Dans l'organisme, ils sont tout à fait distincts ; par exemple, le rein et le foie ont des structures définies et ne passent pas à travers une série de formes intermédiaires. Le développement est *canalisé* vers des points terminaux précis. Des changements génétiques et des perturbations environnementales détournent parfois le cours du développement (représenté par le parcours de la balle) du fond de la vallée vers un versant voisin, mais à moins que la pression ne lui fasse franchir le sommet vers une autre vallée, le processus de développement poursuivra son cours. Il ne retournera pas au point auquel il a commencé mais à un stade quelconque et ultérieur du chemin canalisé du changement. Il s'agit de la régulation.

Le concept de la chréode est très voisin de celui du champ morphogénétique, mais il explicite la dimension temporelle qui n'est qu'implicite dans le dernier.

Ces deux concepts ont été développés récemment par le mathématicien René Thom en tant que partie d'une vaste tentative de créer une théorie mathématique embrassant non seulement la morphogenèse mais encore le comportement et le langage. (31) Sa préoccupation principale consiste à trouver un formalisme mathématique approprié pour ces problèmes qui résistent depuis si longtemps à un tel traitement. L'objectif final est de produire des modèles mathématiques qui correspondraient d'aussi près que possible aux processus de développement. Ils seraient topologiques, qualitatifs plutôt que quantitatifs, et ne dépendraient d'aucun schème particulier d'explication causale : « Une caractéristique essentielle de notre utilisation de modèles locaux est qu'elle n'implique rien quant à la « nature ultime de la réalité » ; même si elle est toujours révélée par l'analyse compliquée au-delà de la description, seule une partie de sa manifestation, les prétendues données observables, relève en définitive de la description macroscopique du système. La phase espace de notre modèle dynamique est définie comme utilisant essentiellement ces données observables et sans référence à de quelconques structures sous-jacentes plus ou moins chaotiques. » (32)

Le problème de cette approche réside dans le fait qu'elle est essentiellement descriptive ; elle fait peu pour *expliquer* la morphogenèse. Il en va de même pour toutes les théories organicistes de la morphogenèse existantes. Comparez par exemple la chréode de Waddington à l'entéléchie de Driesch. Ces deux concepts incluent l'idée que le développement est guidé ou canalisé dans l'espace et le temps par quelque chose qu'on ne peut considérer en soi comme restreint à un lieu et à un moment particuliers. Ils voient cela comme incluant en soi d'une manière ou d'une autre la finalité ou l'objectif du processus de développement et ils fournissent donc une manière de penser en ce qui concerne la régulation. Une différence essentielle existe cependant : Driesch tente de dire comment le processus qu'il propose pourrait fonctionner, alors que Waddington ne le fait pas. Le concept de la chréode est donc moins susceptible d'être attaqué puisqu'il demeure très vague. (33) Waddington considère en fait les concepts des chréodes et des champs morphogénétiques comme étant « essentiellement une commodité descriptive ». (34) A l'instar d'un certain nombre d'organicistes, il nie avoir suggéré autre chose que l'opération des causes physiques connues. (35) Cependant tous les organicistes n'adhèrent pas à cette attitude et certains laissent cette question en suspens. Cette attitude ouvertement non-engagée est illustrée par la discussion suivante de B.C. Goodwin des champs morphogénétiques :

« Un des aspects du champ est que des forces électriques peuvent l'affecter. On a découvert que d'autres organismes en développement ou en régénération présentaient des modèles de champ électrique intéressants et significatifs, mais je ne souhaiterais pas suggérer que le champ morphogénétique est essentiellement électrique. Certaines substances chimiques affectent aussi la polarité et d'autres aspects spatiaux des organismes en développement ; et là encore je ne souhaiterais pas tirer la conclusion que le champ morphogénétique est essentiellement chimique ou biochimique par nature. Je suis persuadé que cette investigation devrait être poursuivie en se fondant sur la présomption que cela pourrait être certaines, ou toutes ou aucune de ces « choses », et qu'en dépit de l'agnosticisme en ce qui concerne sa nature matérielle, il joue un rôle de première importance dans le processus de développement. » (36)

L'ouverture de ce concept en fait le point de départ le plus pro-

metteur pour une théorie organiciste détaillée de la morphogenèse. Mais il est évident que si les champs morphogénétiques sont considérés comme étant tout à fait explicables en termes de principes physiques connus, ils ne représentent rien qu'une terminologie ambiguë superposée à une version sophistiquée de la théorie mécaniste. Il sera possible d'élaborer une théorie vérifiable en supposant qu'ils jouent un rôle causal, lequel demeure à l'heure actuelle non reconnu par la physique. Les chapitres suivants traitent de cette possibilité.

NOTES

(1) Cf Crick et Lawrence (1975) en ce qui concerne un exemple de la manière selon laquelle une considération des résultats de la recherche descriptive peut conduire à la formulation d'hypothèses.

(2) Cf Wolpert (1978) pour une relation récente.

(3) King et Wilson (1975).

(4) Ibid.

(5) Mac Williams et Bonner (1979).

(6) Sheldrake (1973).

(7) Cf Meinhardt (1978) pour une discussion théorique récente de ce problème.

(8) Robert et Hyams (1979).

(9) Nicolis et Prigogine (1977).

(10) Driesch (1914).

(11) Driesch (1929).

(12) Driesch (1908).

(13) Driesch (1929).

(14) Ibid.

(15) Ibid.

(16) Ibid.

(17) Ibid.

(18) Ibid.

(19) Ibid.

(20) Eddington (1935).

(21) Eccles (1953).

(22) E.g. Walker (1975) ; Whiteman (1977) ; Hasted (1978) ; Lawden (1980).

(23) Cf le concept de la « causalité mnénique » discuté par Bertrand Russell (1921).

(24) L'idée que la mémoire et l'instinct sont deux aspects du même phénomène a été proposée entre autres par Butler (1878), Semon (1921) et Rignano (1926). Ces auteurs présument cependant que l'héritage de la mémoire intervient physiquement à travers le plasma germinatif, ce qui implique une sorte d'héritage lamarckien.

(25) Carington (1945).

(26) Hardy (1965).

(27) Cf Haraway (1976) pour une discussion de ces influences et une relation du développement subséquent des idées organicistes. On doit à Von Bertalanffy (1933) le meilleur des premiers résumés de l'approche organiciste de la morphogenèse.

(28) Gurwitsch (1922).

(29) Cf l'ouvrage de P. Weiss, *Principles of Development* (1939) pour un exposé systématique de ces idées.

(30) Waddington (1957).

(31) Thom (1972).

(32) Ibid.

(33) Waddington ne rend même pas explicite le fondement organiciste de ces concepts pour la raison exposée dans le passage suivant, écrit vers la fin de sa carrière :

« J'ai choisi de ne pas révéler au public ces vues philosophiques parce que je ne suis pas agressif et que je vis à une époque agressive et antimétaphysique. Un essai que j'ai écrit vers 1928 sur « la controverse vitaliste-mécaniste et le processus de l'abstraction » n'a jamais été publié. Au lieu de quoi, j'ai tenté de mettre en pratique la vision de Whitehead, en particulier dans les situations expérimentales. Donc, les biologistes qui ne s'intéressent pas à la métaphysique ne remarquent pas ce qui lui est sous-jacent — quoique en général, ils réagissent comme s'ils se sentaient obscurément mal à l'aise. » (Waddington, 1969.)

(34) Waddington (1969).

(35) E.g. Elsasser (1966, 1975) ; Von Bertalanffy (1971). Cf Sheldrake (1981) pour une discussion de l'« organicisme mécaniste ».

(36) Goodwin (1979).

CHAPITRE 3

LES CAUSES DE LA FORME

3.1. Le problème de la forme

Que la forme pose un problème n'est pas un fait évident. Le monde qui nous entoure est fait de formes ; nous les reconnaissons dans chaque acte de perception. Nous avons toutefois tendance à oublier qu'il existe un fossé entre cet aspect de notre expérience, que nous considérons comme allant de soi, et les facteurs quantitatifs auxquels s'intéresse la physique : la masse, la vitesse, l'énergie, la température, la pression, la charge électrique, etc. (1)

Les relations entre les facteurs quantitatifs de la physique sont exprimables de manière mathématique, et les modifications physiques descriptibles au moyen d'équations. La construction de ces équations est possible parce que les grandeurs physiques fondamentales sont conservées selon les principes de conservation de la masse et de l'énergie, de la quantité de mouvement, de la charge électrique, etc. : la quantité totale de masse et d'énergie, de quantité de mouvement, de charge électrique, etc. avant une modification physique donnée est égale à la quantité totale après cette modification. La forme quant à elle n'entre pas dans ces équations : elle n'est ni une valeur vectorielle ni une grandeur scalaire et elle n'est pas conservée. Ainsi, jetez au feu un bouquet de fleurs et laissez-le se réduire en poussière, la quantité totale de matière et d'énergie ne sera pas modifiée, mais la forme des fleurs aura tout simplement disparu.

Il existe des instruments permettant de mesurer avec un haut degré de précision les grandeurs physiques. Il est en revanche impossible de

mesurer la forme sur une échelle quantitative ; ce calcul est par ailleurs inutile même pour des scientifiques. Un botaniste ne mesure pas la différence entre deux espèces sur le cadran d'un instrument ; un entomologiste n'a pas besoin d'une machine pour reconnaître des papillons, ni un anatomiste des os, ni un histologue des cellules. Toutes ces formes sont reconnues de manière directe. Les spécimens de végétaux sont alors conservés dans des herbiers, ceux de papillons et d'os dans des vitrines, et ceux de cellules sur des lames de microscopes. En tant que formes, elles ne sont rien de plus que ce qu'elles sont ; elles ne peuvent être réduites à autre chose. La description et la classification des formes est en fait le souci majeur de diverses branches de la science ; même dans une science physique telle que la chimie, un objectif majeur est la reconnaissance des formes des molécules, représentées de manière graphique au moyen de « formules développées » bidimensionnelles ou de modèles moléculaires tridimensionnels du type « boule et tige ».

Les formes de tous les systèmes, jusqu'aux plus simples, ne peuvent être représentées que visuellement — par des photographies, par des dessins ou par des modèles. Il est impossible de les représenter à l'aide de formules mathématiques. Les méthodes topologiques, fût-ce les plus évoluées, ne sont pas suffisamment développées pour fournir des formules mathématiques correspondant, disons à une girafe ou à un chêne. Certaines méthodes nouvelles telles celles mises au point par Thom et d'autres permettront peut-être de résoudre ce type de problèmes, mais elles se heurtent à des difficultés sur le plan non seulement pratique mais encore théorique. (2)

Si la simple description des formes statiques, fût-ce les plus simples, pose un problème mathématique d'une difficulté considérable, la description des changements de formes, ou de la morphogenèse, est encore plus complexe. C'est le sujet de la « théorie des catastrophes » de Thom, qui classifie et décrit en termes généraux les types possibles de changements de formes, ou « catastrophes ». Il applique cette théorie aux problèmes soulevés par la morphogenèse en construisant des modèles mathématiques dans lesquels la finalité ou l'objectif d'un processus morphogénétique, la forme définitive, est représentée par un « attracteur » au sein d'un champ morphogénétique. Il postule que chaque objet, ou forme physique, peut être représenté par un tel attracteur et que toute morphogenèse « peut être décrite par la disparition des attracteurs représentant les formes ini-

tiales, et leur remplacement par les attracteurs représentant les formes finales ». (3)

Les formules permettant de développer des modèles topologiques correspondant à des processus morphogénétiques particuliers sont le résultat de tâtonnements et d'intuitions inspirées. Si une expression mathématique fournit trop de solutions, il convient d'y introduire des restrictions, et si une fonction est trop restreinte, il convient de recourir à une autre plus généralisée. Thom espère qu'en recourant à des méthodes de ce genre, il sera en définitive possible de développer des expressions topologiques qui correspondent en détail à des processus morphogénétiques véritables. Mais même ainsi, ces modèles ne permettraient probablement pas de réaliser des prévisions quantitatives. Leur valeur principale réside sans doute dans le fait qu'ils attirent l'attention sur des analogies formelles entre divers types de morphogenèse. (4)

Le formalisme mathématique de la Théorie de l'Information paraît, à première vue, préférable à cette approche topologique. La Théorie de l'Information a en réalité un champ d'application sérieusement limité. Elle fut développée à l'origine par des ingénieurs en télécommunication dans le cadre de la transmission de messages d'une source à un récepteur, via un canal. La question à laquelle elle s'employait alors à répondre était la suivante : comment les caractéristiques d'un canal influencent-elles la quantité d'information susceptible d'être transmise à un moment donné ? L'un des résultats fondamentaux est la découverte du fait que dans un système fermé, aucune information n'est transmissible au récepteur outre celle contenue dans la source, quoique la forme de l'information puisse être modifiée : ainsi les points et les traits du morse sont-ils transformés en mots. Le contenu informatif d'un événement est défini non par ce qui s'est passé, mais plutôt par rapport à ce qu'il aurait *pu* advenir. Des symboles binaires sont en général utilisés à cet égard et le contenu informatif d'un modèle est déterminé par rapport au nombre de décisions positives ou négatives nécessaires pour spécifier quelle classe particulière de modèle s'est produite parmi un ensemble.

Cette théorie a une certaine valeur en biologie dans le cadre de l'étude quantitative de la transmission des impulsions par les fibres nerveuses ; elle s'applique dans une moindre mesure à la transmission d'une séquence de bases de l'ADN des parents à celui de leur progéniture, quoique même dans un cas aussi simple que celui-ci elle puisse s'avérer sérieusement fallacieuse, parce qu'il se produit dans

les organismes vivants des phénomènes qui ne se produisent pas dans les câbles téléphoniques : les gènes peuvent muter ; des parties de chromosomes subir des inversions, des translocations, etc. Mais, la Théorie de l'Information n'est pas applicable à la morphogenèse biologique : elle s'applique uniquement à la transmission de l'information dans des systèmes fermés, et ne rend pas compte d'une augmentation du contenu d'information dans ce processus. (5) Les organismes en développement ne sont pas des systèmes fermés, et leur *développement* est épigénétique ; c'est-à-dire que la complexité de forme et d'organisation s'accroît. Les biologistes mécanistes parlent souvent d'« information génétique », d'« information positionnelle », etc. comme si ces termes recouvraient une signification bien précise, mais c'est une illusion : ils empruntent le langage de la Théorie de l'Information, mais négligent sa rigueur.

Précisons toutefois que même s'il était possible — par l'une ou l'autre méthode — de réaliser des modèles mathématiques extrêmement détaillés des processus morphogénétiques, et même si ces modèles permettaient des prévisions en accord avec les observations expérimentales, la question se poserait toujours de savoir à quoi correspondent ces modèles. En fait, cette question se pose quant à la correspondance entre les modèles mathématiques et les observations empiriques dans tous les domaines scientifiques.

Une réponse nous est fournie par un mysticisme mathématique du type pythagoricien : l'univers est perçu comme dépendant d'un ordre mathématique fondamental qui engendre d'une certaine manière tous les phénomènes empiriques ; cet ordre transcendant n'est révélé et rendu compréhensible que par les méthodes mathématiques. Il est rare que cette attitude soit prônée de manière explicite, elle n'en exerce pas moins une profonde influence sur la science moderne et se retrouve souvent, sous une forme plus ou moins déguisée, parmi les mathématiciens et les physiciens.

La correspondance peut, à l'inverse, être expliquée par la tendance de l'esprit à rechercher et à trouver l'ordre dans l'expérience : les structures ordonnées des mathématiques, créations de l'esprit humain, sont confrontées à l'expérience, et celles qui ne correspondent pas sont écartées ; ainsi, par un processus évoquant la sélection naturelle, les formules mathématiques les mieux adaptées sont retenues. Dans cette optique, l'activité scientifique est concernée uniquement par le développement et par l'évaluation empirique des modèles mathématiques d'aspects plus ou moins définissables du monde ; elle

ne peut donc déboucher sur une compréhension fondamentale de la réalité.

Il existe toutefois un autre type d'approche du problème de la forme, qui ne nécessite ni une acceptation du mysticisme pythagoricien, ni le renoncement à la possibilité de l'explication. Si nous voulons comprendre les formes des choses, nous ne devons pas les expliquer en termes de *nombres*, mais en termes de *formes* plus fondamentales. Platon considèrerait que les formes dans le monde de l'expérience sensorielle sont pareilles à des reflets imparfaits de Formes ou d'Idées transcendantes, archétypes. Cette doctrine, fortement influencée par le mysticisme des pythagoriciens, ne permet toutefois pas d'expliquer comment les Formes éternelles sont reliées au monde phénoménal en changement. Aristote croyait qu'il était possible de résoudre ce problème en considérant les formes des choses comme étant immanentes, plutôt que transcendantes : les formes spécifiques étaient non seulement inhérentes aux objets, mais encore elles leur *conféraient* véritablement leurs formes caractéristiques.

Ce type d'alternative au mysticisme pythagoricien a été développé dans les théories non-mécanistes de la morphogenèse. Les formes spécifiques des organismes vivants étaient provoquées, dans le système de Driesch — qui se fonde explicitement sur celui d'Aristote — par un agencement non-énergétique : l'entéléchie. Les champs morphogénétiques et les chréodes des organicistes jouent un rôle similaire dans la conduite des processus morphogénétiques vers des formes définitives spécifiques. Leur nature n'en demeure pas moins obscure jusqu'à présent.

Ce manque de clarté est peut-être dû, en partie, à la tendance platonicienne de maintes pensées organicistes, (6) particulièrement apparente dans le système philosophique de A.N. Whitehead. Whitehead postula que tout événement réel implique ce qu'il nomme des « objets éternels » ; ces derniers formaient collectivement le domaine de possibilités et incluaient toutes les formes possibles ; ils ressemblaient en fait étonnamment aux « formes platoniciennes » (7). Il est toutefois évident qu'une notion métaphysique des champs morphogénétiques considérés comme des formes platoniciennes ou comme des objets éternels aurait peu de valeur aux yeux de la science expérimentale. Ils ne favoriseront une compréhension scientifique de la morphogenèse que si on les considère comme des entités physiques ayant des effets physiques.

La philosophie organiciste englobe la biologie et la physique ; en

conséquence si on considère que les champs morphogénétiques jouent un rôle causal dans la morphogenèse biologique, il convient d'en déduire qu'il en va de même dans le cas de la morphogenèse de systèmes plus simples tels que des cristaux ou des molécules. De tels champs ne sont pas reconnus dans les théories existantes de la physique. Il importe donc de se demander dans quelle mesure les théories existantes sont capables d'expliquer la morphogenèse de systèmes purement chimiques. Si elles permettent une explication adéquate, l'idée des champs morphogénétiques est sans raison d'être ; mais si ce n'est pas le cas, la voie est ouverte à une hypothèse nouvelle de la causalité de la forme par rapport aux champs morphogénétiques tant des systèmes biologiques que non-biologiques.

3.2. Forme et énergie

Toute cause était considérée, dans la physique newtonienne, en termes d'*énergie*, le principe du mouvement et du changement.

Tout objet en mouvement renferme de l'énergie — l'énergie cinétique des corps en mouvements, la vibration thermique et le rayonnement électromagnétique — et cette énergie peut mettre en mouvement d'autres objets. Des objets statiques renferment aussi de l'énergie, une énergie potentielle due à leur tendance à se mouvoir ; ils ne sont statiques que parce qu'ils sont entravés par des forces qui s'opposent à cette tendance.

On a cru que l'attraction gravitationnelle dépendait d'une force qui agissait à distance mettant les objets en mouvement ou leur conférant une tendance à se mouvoir, une énergie potentielle. Il était toutefois impossible d'avancer la moindre raison quant à l'existence de cette force d'attraction à proprement parler. Les effets gravitationnels et électromagnétiques sont en revanche expliqués aujourd'hui en termes de *champs*. Les forces newtoniennes étaient censées naître d'une manière inexplicable de corps physiques, à partir desquels elles se répandaient dans l'espace alors qu'en physique moderne les champs sont primordiaux : ils sont sous-jacents tant aux corps matériels qu'à l'espace les séparant.

Cette vision est compliquée du fait qu'il existe plusieurs types de champs. Primo : le champ gravitationnel, qui dans la théorie de la relativité générale d'Einstein est assimilé à l'espace-temps et qui est considéré comme étant courbe en présence de la matière. Secundo : le champ électromagnétique, dans lequel des charges électriques sont

localisées, et à travers lequel des radiations électromagnétiques se propagent en tant que perturbations vibratoires. Ces perturbations sont considérées, dans la théorie quantique, comme étant un type de particule, les photons, associés à des quantas d'énergie. Tertio : dans la théorie du champ quantique de la matière, les particules élémentaires sont envisagées comme des quantas d'excitation des champs matériels. Chaque type de particule a son type de champ spécifique : un proton est un quantum du champ proton-antiproton, un électron est un quantum du champ électron-positron, etc.

Dans ces théories, les phénomènes physiques sont expliqués par une combinaison des concepts de champs spaciaux et d'énergie, et pas uniquement en termes d'énergie. Ainsi, bien que l'énergie puisse être considérée comme étant la cause du changement, l'*ordonnance* du changement dépend de la structure spatiale des champs. Ces structures ont des effets physiques, mais elles ne sont pas en soi un type d'énergie ; elles agissent en tant que causes « géométriques » ou spatiales. La différence radicale entre cette idée et la notion de cause exclusivement énergétique est illustrée par le contraste entre la théorie de la gravité du Newton et celle d'Einstein : ainsi, selon la première, la lune tourne autour de la terre parce qu'elle est attirée vers elle par une force d'attraction ; selon la seconde, la rotation se produit parce que l'espace même dans lequel elle évolue est courbe.

La compréhension moderne de la structure des systèmes chimiques dépend des concepts de la mécanique quantique et de l'électromagnétisme ; les effets gravitationnels sont en comparaison très petits et peuvent être ignorés. Les diverses manières selon lesquelles les atomes peuvent se combiner sont données par l'équation de Schrödinger de la mécanique quantique, qui permet de calculer les orbites des électrons en termes de probabilité ; ces orbites peuvent être considérées, dans la théorie de la matière dite du champ quantique, comme étant des structures au sein du champ électron-positron. Mais les électrons et les noyaux atomiques étant chargés électriquement, ils sont également associés à des modèles spatiaux dans le champ électromagnétique, et donc à des énergies potentielles. Tous les arrangements spatiaux d'un nombre donné d'atomes n'ont pas la même énergie potentielle et seul l'arrangement présentant la plus faible énergie potentielle sera stable pour les raisons exposées dans la Fig. 6. Si un système se trouve dans un état ayant une énergie supérieure à celle d'états alternatifs possibles, le moindre déplacement (dû, par exemple, à une agitation thermique) le fera évoluer vers un autre état

(A). Si, en revanche, il se trouve dans un état ayant une énergie inférieure à celle des alternatives possibles, il reviendra, après des déplacements mineurs, à cet état qui est par conséquent stable (B). Il arrive également qu'un système reste dans un état qui n'est pas le plus stable aussi longtemps qu'il n'aura pas été déplacé au-delà d'une « barrière » (C) ; dès qu'il aura franchi une certaine limite, il évoluera vers un autre état plus stable, caractérisé par une énergie inférieure.

La forme et l'énergie

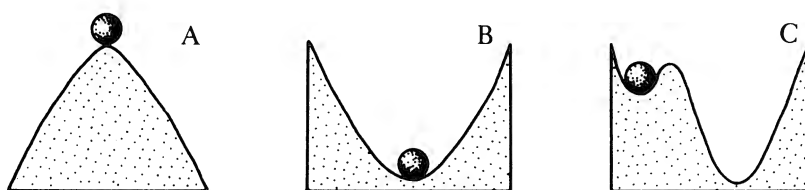


FIGURE N° 6 : Représentation graphique d'états instable (A), stable (B) et partiellement stable (C).

Ces considérations énergétiques déterminent quel est l'état le plus stable d'une structure chimique, mais elles ne rendent pas compte de ses caractéristiques spatiales, représentées dans la Fig. 6 par les courbes le long desquelles les boules roulent, et qui agissent comme des barrières les limitant. Celles-ci dépendent des modèles spatiaux déterminés par les champs de matière et par l'électromagnétisme.

Selon le second principe de thermodynamique, les processus spontanés se déroulant au sein d'un système fermé tendent vers un état

d'équilibre ; ceci se produisant, les différences initiales de température, de pression, etc. entre les différentes parties du système tendent, elles, à disparaître. En termes techniques : l'entropie d'un système macroscopique fermé demeure égale à elle-même ou s'accroît.

L'importance de cette loi est souvent exagérée dans les ouvrages de vulgarisation ; le terme entropie, en particulier, est considéré comme étant synonyme de « désordre ». La complexité d'organisation croissante qui se produit dans l'évolution et dans le développement des organismes vivants semble alors être en contradiction avec le principe d'entropie croissante. Cette confusion provient d'une mauvaise compréhension des limites de la science de la thermodynamique. Précisons pour commencer qu'elle s'applique uniquement à des systèmes fermés, alors que les organismes vivants sont des systèmes ouverts, échangeant matière et énergie avec leur environnement. Elle traite ensuite uniquement des inter-relations entre la chaleur et les autres formes d'énergie : elle s'applique aux facteurs énergétiques qui affectent les structures chimiques et biologiques, mais pas à l'existence de ces structures en premier lieu. Et troisièmement, la définition technique de l'entropie entretient peu de relation avec toute conception non-technique du désordre ; en particulier, elle n'est pas concernée par le type d'ordre inhérent aux structures spécifiques des systèmes chimiques et biologiques. Selon le troisième principe de la thermodynamique, au zéro absolu, les entropies de tous les solides cristallins purs sont égales à zéro. Ils sont parfaitement « ordonnés » d'un point de vue thermodynamique parce qu'il n'y a pas de désordre dû à l'agitation thermique. Tous sont également ordonnés de manière égale : il n'existe pas de différence d'entropie entre un simple cristal de sel et un cristal d'une macromolécule organique d'une complexité extrême telle que l'hémoglobine. Il s'ensuit que la plus grande complexité structurale de la dernière n'est pas mesurable en termes d'entropie.

La différence entre l'« ordre » au sens d'une structure chimique ou biologique, et l'« ordre » thermodynamique dû à des inégalités de température, etc., dans un grand système formé d'atomes et de molécules innombrables est illustré par le processus de cristallisation. Si une solution saline est placée dans une capsule dans une pièce froide, le sel se cristallisera au fur et à mesure que la solution se refroidira. Au départ, les ions qui constituent le sel sont répartis au hasard dans la solution, mais au cours de la cristallisation, ils s'ordonnent avec

une grande régularité dans les cristaux, et ces derniers s'agencent eux-mêmes en structures symétriques au niveau macroscopique. D'un point de vue morphologique, il s'est produit une augmentation considérable de l'ordre ; mais d'un point de vue thermodynamique, il y a eu une réduction de l'ordre et une augmentation de l'entropie, dues à l'égalisation de la température entre la solution et son environnement, et à la libération de chaleur durant le processus de cristallisation, débouchant sur une plus grande agitation thermique des molécules du solvant.

De même, lorsqu'un embryon d'animal croît et se développe, on enregistre un accroissement d'entropie du système thermodynamique formé de l'embryon et de l'environnement dont il tire sa nourriture et dans lequel il libère de la chaleur et des produits excrémentiels. Le deuxième principe de thermodynamique sert à mettre en évidence cette dépendance des organismes vivants par rapport aux sources extérieures d'énergie, mais il n'explique en rien leurs formes spécifiques.

En termes très généraux, la forme et l'énergie entretiennent une relation inverse l'une par rapport à l'autre : l'énergie est le principe de changement, mais une forme ou une structure ne peut exister qu'aussi longtemps qu'elle a une certaine stabilité et un certain degré de résistance au changement. Cette opposition est nettement apparente dans la relation existant entre les états de matière et la température. Dans des conditions de froid suffisantes, les substances existent sous des formes cristallines dans lesquelles les arrangements des molécules révèlent un degré élevé de régularité et d'ordre. Si la température augmente, l'énergie thermique provoquera à un certain niveau, la désintégration de la forme cristalline ; le solide fond. Les molécules s'arrangent, à l'état liquide, selon des modèles transitoires qui se déplacent et changent constamment. Les forces entre les molécules créent une tension de surface qui imprime des formes simples au liquide dans son ensemble, ainsi qu'au niveau des gouttes sphériques. La température continuant à augmenter, le liquide se vaporise ; les molécules sont isolées à l'état gazeux et se comportent de manière plus ou moins indépendante les unes des autres. A des températures encore plus élevées, les molécules mêmes se désintègrent en atomes, et si on augmente toujours plus la température, les atomes se scindent et libèrent un mélange gazeux d'électrons et de noyaux atomiques, dit plasma.

Considérons cette séquence à l'envers, des structures de plus en

plus complexes et organisées apparaîtront au fur et à mesure que la température se réduira, les plus stables pour commencer, les moins stables en définitive. Un plasma se refroidissant, un nombre approprié d'électrons se rassemblent autour des noyaux atomiques et occupent leurs orbites adéquates. Les atomes s'agencent ensuite en molécules. Des forces supra-moléculaires entrent en jeu, lorsque le gaz se condense en gouttelettes. Enfin, lorsque le liquide se cristallise, un degré élevé d'ordre supra-moléculaire est établi.

Ces formes apparaissent spontanément. Elles sont inexplicables en termes d'énergie externe, si ce n'est de manière négative, en ce sens qu'elles ne peuvent se former et subsister qu'au-dessous d'une certaine température. Elles ne sont explicables en termes d'énergie interne que dans la mesure où parmi l'éventail d'arrangements structuraux possibles, seul celui ayant l'énergie potentielle la plus basse sera stable ; c'est en conséquence la structure qui tendra à être adoptée spontanément.

3.3. La prévision des structures chimiques

La mécanique quantique est capable de décrire en détails les orbites électroniques et les états d'énergie du plus simple de tous les systèmes chimiques, l'atome d'hydrogène. Ses méthodes perdent toutefois de leur précision avec des atomes plus compliqués et même avec les molécules chimiques les plus simples ; la complexité des calculs devient formidable, et seules des méthodes approximatives peuvent être utilisées. Des calculs précis sont impossibles — du moins en pratique — pour des molécules et des cristaux complexes. Il est possible de discerner de manière empirique les structures des molécules et des arrangements atomiques dans les cristaux par des méthodes chimiques et cristallographiques ; ces structures sont en fait plus ou moins prévisibles par les chimistes et par les cristallographes sur base de lois empiriques. Mais ceci est sans rapport avec le fait de fournir une explication fondamentale des structures chimiques au moyen de l'équation d'onde de Schrödinger.

Il importe d'être conscient de cette limitation sérieuse de la mécanique quantique. Elle contribue sans conteste à fournir une compréhension qualitative ou semi-quantitative des liens chimiques et de certains aspects des cristaux, telle la différence entre les isolateurs et les conducteurs électriques. Elle ne permet toutefois pas de prévoir à partir des principes premiers les formes et les propriétés de molécules

et de cristaux — fussent-ils simples. La situation est pire en ce qui concerne l'état liquide, pour lequel il n'existe encore aucune justification quantitative satisfaisante. Il est en outre illusoire d'imaginer que la mécanique quantique explique de manière détaillée ou rigoureuse les formes et les propriétés des molécules très complexes et des agrégats macro-moléculaires étudiés par les biochimistes et les biologistes moléculaires, pour ne rien dire de la complexité considérablement supérieure de la plus simple cellule vivante.

La conception selon laquelle la chimie fournit un fondement solide à une compréhension mécaniste de la vie est tellement répandue, qu'il est peut-être nécessaire de montrer sur quelles bases ténues de théorie physique repose la chimie même. Citons Linus Pauling :

« Il est permis de croire les théoriciens de la physique qui nous disent que toutes les propriétés des substances devraient être calculées par des méthodes connues de l'équation de Schrödinger. Nous avons pourtant constaté qu'au cours des trente années qui suivirent la découverte de l'équation de Schrödinger, seuls quelques rares calculs de mécanique quantique non empiriques et précis intéressant la chimie ont été réalisés concernant les propriétés des substances. Le chimiste dépend toujours de l'expérience pour la plupart des informations ayant trait aux propriétés des substances ». (8)

Vingt ans se sont écoulés depuis cette déclaration. Des améliorations importantes ont été enregistrées dans les méthodes de calculs approximatives des chimistes quantiques. Or, la situation ne s'est guère modifiée.

Il est toutefois permis de rétorquer que des calculs détaillés pourraient être réalisés en principe. Mais, en admettant même — pour ouvrir la discussion — que ces calculs puissent être réalisés en pratique, il est impossible de prévoir s'ils seront *corrects*, c'est-à-dire s'ils seront en accord avec les observations empiriques. Rien ne permet donc de conforter à l'heure actuelle l'hypothèse conventionnelle selon laquelle des structures chimiques et biologiques complexes peuvent être totalement expliquées en fonction d'une théorie physique existante.

La raison de la difficulté, sinon de l'impossibilité à prévoir la forme d'une structure chimique complexe sur la base des atomes la constituant est peut-être plus évidente si l'on veut se reporter à ce

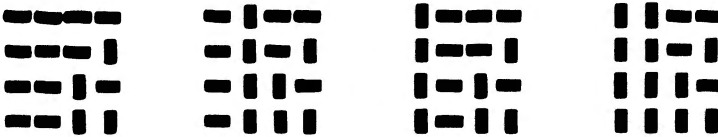
2 blocs : $2^2 = 4$ combinaisons



3 blocs : $2^3 = 8$ combinaisons



4 blocs : $2^4 = 16$ combinaisons



5 blocs : $2^5 = 32$ combinaisons

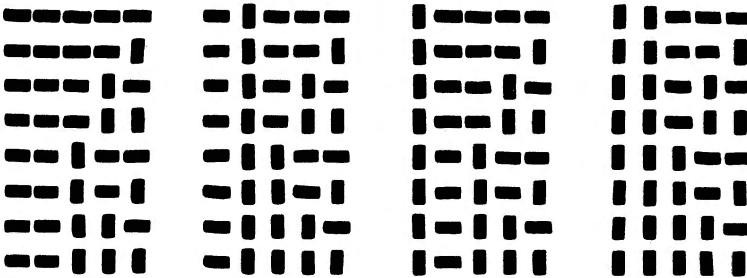


FIGURE N° 7 : Combinaisons possibles de blocs pouvant être joints horizontalement ou verticalement.

simple exemple. Considérons des blocs élémentaires constitutifs, qui peuvent s'ajouter les uns aux autres à raison d'un à la fois et soit horizontalement soit verticalement (Fig. 7). Si nous disposons de deux « blocs », il existe $2^2 = 4$ combinaisons possibles ; avec trois « blocs », $2^3 = 8$; avec 4, $2^4 = 16$; avec 5, $2^5 = 32$; avec 10, $2^{10} = 1\,024$; avec 20, $2^{20} = 1\,048\,576$; avec 30, $2^{30} = 1\,073\,741\,824$, etc. Le nombre de possibilité devient vite énorme.

Les différents arrangements possibles des atomes ont, dans un système chimique, des énergies potentielles différentes dues aux

inter-actions électriques et autres s'exerçant entre eux ; le système aura tendance à adopter spontanément la structure présentant une énergie potentielle minimum.

Dans un système simple ne présentant que quelques structures possibles, l'une peut avoir une énergie nettement inférieure aux autres. Ceci est représenté dans la Fig. 8A par le fond du « logement potentiel » minimum ; d'autres possibilités moins stables sont représentées par des minima locaux adjacents à ce logement. Le nombre de structures possibles s'accroît dans des systèmes de complexité croissante ; ce faisant les chances qu'il existe une structure d'énergie minimum unique semblent susceptibles de se réduire. Dans la situation représentée par la Fig. 8D, plusieurs structures seraient également stables d'un point de vue énergétique. Si on constatait que le système adopte au hasard l'une ou l'autre de ces structures possibles, ou qu'il oscille entre elles, il n'y aurait pas problème. Mais, s'il adoptait invariablement l'une de ces structures à l'exclusion des autres, on pourrait en déduire que l'énergie n'est pas le seul facteur déterminant cette struc-

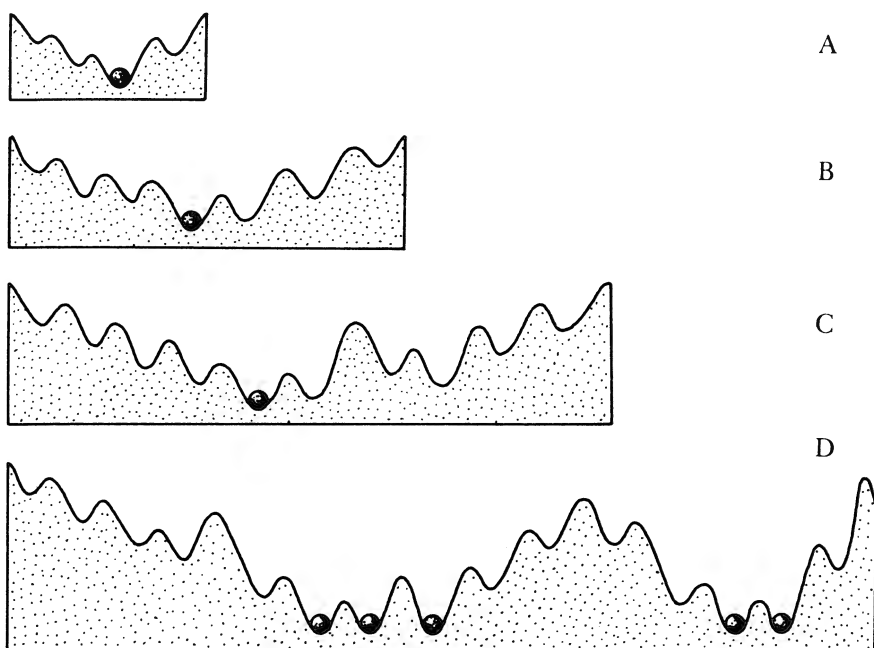


FIGURE N° 8 : Représentation graphique des structures possibles de systèmes de complexité croissante. En A, il existe une structure d'énergie minimum unique, mais en D plusieurs structures possibles sont également stables.

ture particulière plutôt que d'autres, également possibles en principe. La physique ne reconnaît toutefois pas à l'heure actuelle l'existence d'un tel facteur.

Les chimistes, les cristallographes et les biologistes moléculaires sont dans l'impossibilité de réaliser les calculs détaillés nécessaires pour prévoir la ou les structure(s) d'énergie minimum d'un système *a priori* ; ils sont toutefois capables d'utiliser diverses méthodes approximatives en combinaison avec des données empiriques concernant les structures de substances similaires. Ces calculs ne permettent pas, en général, de prédire des structures uniques (si ce n'est pour les systèmes les plus simples), mais seulement une série de structures possibles ayant des énergies minimum plus ou moins égales. Ainsi, ces résultats approximatifs paraissent renforcer l'idée selon laquelle des considérations énergétiques sont insuffisantes pour justifier de la structure unique d'un système chimique complexe. Il est toutefois toujours possible de rejeter cette conclusion en réaffirmant que la structure stable unique doit avoir une énergie inférieure à celle des autres alternatives. Cette affirmation ne pourra jamais être démentie car, en pratique, on ne dispose que de méthodes de calcul approximatives ; la structure unique réalisée en fait pourrait donc toujours être attribuée à des effets énergétiques subtils, qui échappent aux calculs.

Les propos de Pauling, ci-dessous, illustrent la situation eu égard à la structure des cristaux inorganiques :

« Des substances ioniques simples telles que les halogènes alcalins ont un choix de structures limité ; et il existe fort peu d'arrangements ioniques relativement stables correspondant à la formule $M^+ X^-$, et les divers facteurs qui influencent la stabilité du cristal s'opposent les uns aux autres, sans qu'aucun facteur ne s'affirme nécessairement de manière claire dans la décision entre les arrangements du chlorure de sodium et du chlorure de césium. En revanche, dans le cas d'une substance complexe, telle que le mica, $K Al_3 Si_3 O_{10} (OH)_2$, ou la zunyte, $Al_{13} Si_5 O_{20} (OH)_{18} C$, de multiples structures concevables, très peu différentes sur le plan de leur nature et de leur stabilité, peuvent être suggérées, et il est permis de supposer que la plus stable de ces structures possibles, celle adoptée en fait par la substance, reflétera dans ses diverses caractéristiques les différents facteurs qui sont significatifs dans la détermination de la

structure des cristaux ioniques. Il s'est avéré possible de formuler un ensemble de règles ayant trait à la stabilité des cristaux ioniques complexes... Ces règles furent déduites en partie par induction à partir des structures connues en 1928, et en partie par déduction à partir des équations de l'énergie cristalline. Elles ne sont ni rigoureuses dans leur dérivation ni universelles dans leur application, mais elles se sont avérées utiles en tant que critères pour la correction probable de structures rapportées pour des cristaux complexes et en tant qu'aide à l'investigation par rayons X des cristaux, en permettant la suggestion de structures raisonnables pour un test expérimental. » (9)

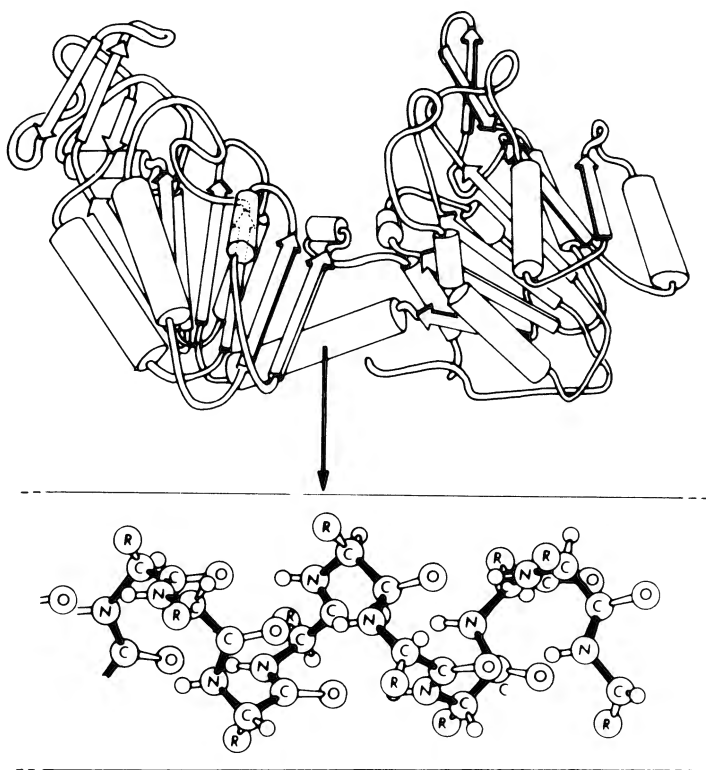


FIGURE N° 9 : En haut : la structure de l'enzyme phosphoglycératokinase, isolée d'un muscle de cheval. Les hélices sont représentées par les cylindres et le repliement en feuillets plissés β par des flèches.
En bas : la structure d'une région hélicoïdale révélée plus en détail (d'après Banks et al., 1979).

L'éventail de structures possibles devient beaucoup plus grand encore en chimie organique, surtout dans le cas de macromolécules telles que les protéines, dont les chaînes polypeptidiques s'enroulent, se tournent et s'enlacent en des formes tridimensionnelles complexes (Fig 9). Nous disposons d'éléments convaincants révélant que dans des conditions où un type donné de molécule protéique est stable, elle s'enroule selon une structure unique. On a amené, au cours de diverses études expérimentales, des protéines à se dérouler selon divers degrés en modifiant leur environnement chimique ; on a constaté ensuite qu'elles reprenaient leur structure normale lorsqu'elles étaient replacées dans des conditions appropriées ; bien qu'elles partent d'états initiaux différents et qu'elles suivent des « voies » d'enroulement également différentes, elles atteignent le même point final structural. (10)

Ce point final stable est probablement une structure d'énergie minimum. Ceci ne prouve pas toutefois que ce soit la *seule* structure possible ayant une énergie minimum ; il est tout à fait possible qu'il existe une multitude de structures possibles ayant la même énergie minimum. En fait, les calculs visant à prévoir la structure tridimensionnelle des protéines, en recourant à diverses méthodes d'approximation, donnent invariablement un nombre beaucoup trop élevé de solutions. On parle à ce propos, dans la littérature consacrée à l'enroulement protéique, de « problème du minimum multiple ». (11)

Il existe de bonnes raisons de croire que la protéine proprement dite ne « teste » pas tous ces minimum avant de trouver le bon. Si la chaîne explorait toutes les configurations possible au hasard, il lui faudrait beaucoup trop de temps pour atteindre la configuration originale. Ainsi, si les résidus individuels d'une chaîne polypeptidique dépliée ne pouvaient exister que selon deux états, ce qui est une sous-estimation grossière, le nombre de conformations possibles engendrées au hasard serait de 10^{45} pour une chaîne comptant 150 résidus amino-acides (bien qu'il soit évident que la majorité seraient impossibles du point de vue de la conformation stérique. Si chaque conformation pouvait être explorée par une rotation moléculaire de fréquence 10, 12 sec), ce qui est une surestimation grossière, il faudrait approximativement 10, 26 ans pour examiner toutes les conformations possibles. La synthèse et l'enroulement d'une chaîne protéique telle que la ribonucléase ou la lysozyme pouvant s'accomplir en deux minutes, il est clair que toutes les conformations ne sont pas

explorées dans le processus d'enroulement. Au lieu de quoi, il nous semble que, en réponse aux interactions locales, la chaîne peptidique soit dirigée le long d'une série de voies à faible énergie possible (relativement peu importantes), traversant peut-être des états intermédiaires uniques vers la conformation présentant l'énergie la plus faible » (S.C. Anfinsen et H.A. Scheraga). (12)

Le processus d'enroulement peut non seulement être « dirigé » selon certaines voies, mais encore vers une conformation particulière d'énergie minimum, plutôt que vers d'autres conformations possibles présentant la même énergie minimum.

Cette discussion conduit à la conclusion générale que les théories existantes de la physique pourraient en fait être incapables d'expliquer les structures uniques de molécules complexes et de cristaux ; elles permettent de suggérer une série de structures d'énergie minimum possibles, mais rien ne prouve qu'elles soient capables d'expliquer le fait qu'une structure soit réalisée de préférence aux autres. Il est par conséquent concevable que quelque facteur autre que l'énergie « sélectionne » entre ces possibilités et donc détermine la structure spécifique adoptée par le système. (13) L'hypothèse qui va être développée maintenant se fonde sur l'idée que cette « sélection » est produite par un nouveau type de cause, actuellement ignorées par la physique, à travers l'agencement des champs morphogénétiques.

3.4. La causalité formative

L'hypothèse de la *causalité formative* suggère que les champs morphogénétiques jouent un rôle causal dans le développement et dans la préservation des formes des systèmes à tous les niveaux de complexité. Dans ce contexte, le mot « forme » inclut non seulement la forme de la surface extérieure, soit la limite d'un système, mais encore sa structure interne. Cette causalité de la forme suggérée par les champs morphogénétiques est qualifiée de causalité formative afin de la distinguer du type énergétique de causalité que la physique a déjà abordé de manière détaillée. (14) Car si les champs morphogénétiques ne peuvent produire leurs effets qu'en conjonction avec les processus énergétiques, ils ne sont pas en soi énergétiques.

L'idée de la causalité formative non-énergétique est plus facile à comprendre si l'on recourt à une analogie architecturale. Il faut disposer de briques et d'autres matériaux de construction pour bâtir une maison ; d'ouvriers également pour agencer les matériaux, et d'un

plan d'architecte qui détermine la forme de la maison. Les mêmes ouvriers travaillant le même nombre d'heures et disposant de la même quantité de matériaux de construction pourraient produire une maison d'une forme totalement différente s'ils se fondaient sur un plan différent. Ainsi, le plan peut-il être considéré comme une *cause* de la forme spécifique de la maison, bien qu'il ne soit pas — c'est évident — la seule cause : la maison ne serait jamais bâtie sans les matériaux de construction et l'activité des ouvriers. De même, un champ morphogénétique est une cause de la forme spécifique adoptée par un système, bien qu'elle soit dans l'impossibilité d'agir sans les « briques fondamentales » adéquates et sans l'énergie nécessaire pour les agencer.

Cette analogie ne tend pas à suggérer que le rôle causal des champs morphogénétiques dépend d'un dessein conscient, mais à mettre en évidence le fait que toutes les causes ne doivent pas nécessairement être énergétiques, même si tous les processus de changement impliquent une énergie. Le plan d'une maison n'est pas en soi un type d'énergie. Même lorsqu'il est dessiné sur le papier ou concrétisé, en définitive, sous la forme d'une maison, il n'a ni poids ni énergie propres. Si le papier est brûlé ou si la maison est démolie, il ne se produit aucune modification mesurable dans la quantité totale de masse et d'énergie ; le plan disparaît tout simplement. De même, les champs morphogénétiques ne sont pas en soi énergétiques selon l'hypothèse de la causalité formative ; ils n'en jouent pas moins un rôle causal dans la détermination des formes des systèmes avec lesquels ils sont associés. Car si un système était associé à un champ morphogénétique différent, il connaîtrait un autre développement. (15) Cette hypothèse est vérifiable de manière empirique dans les cas où il est possible d'altérer les champs morphogénétiques agissant sur des systèmes (cf. plus loin, sections 5.6, 7.4, 11.2, et 11.4).

Les champs morphogénétiques peuvent être considérés comme étant analogues aux champs connus de la physique en ceci qu'ils sont capables d'ordonner des modifications physiques, même si eux-mêmes ne peuvent être observés de façon directe. Les champs gravitationnels et électromagnétiques sont des structures spatiales invisibles, intangibles, inaudibles, insipides et inodores ; elles ne sont décelables que par leurs effets gravitationnels et électromagnétiques. Pour justifier le fait que les systèmes physiques s'influencent les uns les autres à distance sans la moindre connexion matérielle apparente entre eux, ces champs hypothétiques sont dotés de la propriété de tra-

verser l'espace vide, voire de le constituer. En un sens, ils sont immatériels ; mais en un autre sens, ce sont des aspects de la matière parce qu'ils ne peuvent être connus que par leurs effets sur les systèmes matériels. En effet, la définition scientifique de la matière a simplement été élargie pour les prendre en considération. De même, les champs morphogénétiques sont des structures spatiales décelables uniquement à travers leurs effets morphogénétiques sur les systèmes matériels ; eux aussi peuvent être considérés comme des aspects de la matière si l'on accepte d'élargir suffisamment la définition de la matière pour les englober.

Bien que seule la morphogenèse des systèmes biologiques complexes ait été discutée dans les sections précédentes, l'hypothèse de la causalité formative sera considérée comme s'appliquant aux systèmes biologiques et physiques à tous les niveaux de complexité. Chaque type de système ayant sa forme caractéristique propre, chacun doit avoir un type spécifique de champ morphogénétique : ainsi, il doit exister un type de champ morphogénétique pour les protons ; un autre pour les atomes d'azote ; un autre pour les molécules d'eau ; un autre pour les cristaux de chlorure de sodium ; un autre pour les cellules musculaires des vers de terre ; un autre pour les reins des moutons ; un autre pour les éléphants ; un autre pour les hêtres ; etc.

Selon la théorie organiciste, les systèmes ou « organismes » sont organisés de manière hiérarchique à tous les niveaux de complexité. (16) Ces systèmes seront qualifiés, dans le cadre de notre discussion, d'*unités morphiques*. L'adjectif « morphique » (de la racine grecque *morphê* — forme) met en évidence l'aspect structurel, et le substantif « unité », l'unité ou la globalité du système. En ce sens, les systèmes chimiques et biologiques sont composés de hiérarchies d'unités morphiques : un cristal, par exemple, contient des molécules, qui contiennent des atomes, qui contiennent des particules élémentaires. Des cristaux, des molécules, des atomes et des particules élémentaires sont des unités morphiques, au même titre que les animaux, les plantes, les organes, les tissus, les cellules et les organites. Des exemples simples de ce type d'organisation hiérarchique peuvent être visualisés de manière graphique soit sous la forme d'un « arbre » soit sous celle d'une série de « poupées russes ». (Fig. 10)

Une unité morphique de niveau supérieur doit d'une façon ou d'une autre coordonner l'arrangement des parties qui le composent. On conviendra qu'elle agit ainsi par l'influence de son champ morphogénétique sur les champs morphogénétiques d'unités morphiques

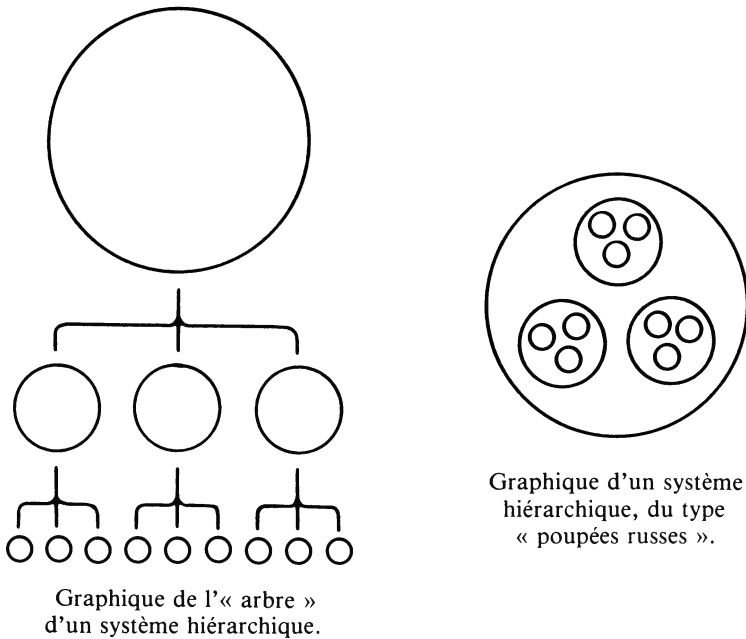


FIGURE N° 10 : Deux façons de représenter un système hiérarchique simple.

du niveau inférieur. Ainsi les champs morphogénétiques, au même titre que les unités morphiques, présentent une organisation essentiellement hiérarchique.

Je discuterai dans le chapitre suivant la manière dont les champs morphogénétiques pourraient agir sur les systèmes soumis à leur influence ; j'aborderai dans le chapitre 5 la question de leur origine propre et de celle de leur structure spécifique.

NOTES

(1) Sinnott (1963) fournit une excellente introduction au problème que pose la forme organique.

(2) Consulter Thom (1972) pour une discussion plus approfondie de ce sujet.

(3) Ibid.

(4) Thom (1975)

(5) Consulter Waddington (1975) pour une discussion des limitations de l'application de l'Information de la Théorie à la biologie.

(6) Ruyer fournit de multiples exemples de la combinaison des aspects de la philosophie

organiciste avec une spéculation explicitement néo-platonicienne, dans son étude d'un petit groupe néo-gnostique aux Etats-Unis, qui compte parmi ses membres un nombre considérable de scientifiques éminents.

(7) Cf. Emmett (1966).

(8) Pauling (1960).

(9) Ibid.

(10) Anfinsen et Scheraga (1975).

(11) Consulter Némethy et Scheraga (1977) pour une discussion actuelle du sujet.

(12) Anfinsen et Scheraga (1975).

(13) Cf. le « principe des classes finies » d'Elsasser (1975).

(14) Cette distinction entre la causalité formative et la causalité énergétique évoque la distinction aristotélicienne entre les « causes formelles » et les « causes efficaces ». L'hypothèse de la causalité formative développée dans les chapitres suivants diffère toutefois radicalement de la théorie d'Aristote, qui présuppose des formes fixes de toute éternité.

(15) Le rôle causal des champs morphogénétiques peut être analysé d'un point de vue théorique, en termes de « conditionnels contrefactuels ». Consulter Mackie (1974) pour une discussion de ces dernières.

(16) Arthur Koestler a suggéré l'emploi du terme *holon* pour ces « systèmes ouverts auto-régulateurs qui expriment à la fois les propriétés autonomes des tous et les propriétés dépendantes des parties » (*in* Koestler et Smythies — 1969). Le champ d'application de ce terme est plus vaste que celui de l'expression « unité morphique » — il inclut, par exemple, les structures linguistiques et sociales — mais il représente un concept très similaire.

CHAPITRE 4

LES CHAMPS MORPHOGÉNÉTIQUES

4.1. Les germes morphogénétiques

La morphogenèse n'intervient pas dans un vide. Elle ne débute qu'à partir d'un système déjà organisé, lequel sert de *germe morphogénétique*. Durant la morphogenèse, une nouvelle unité morphique d'un niveau supérieur se développe autour de ce germe sous l'influence d'un champ morphogénétique spécifique. Mais comment ce champ s'associe-t-il à l'origine au germe morphogénétique ?

Nous savons que l'association de systèmes matériels à des champs liés à la gravitation dépend de leur masse et que celle de systèmes matériels à des champs électromagnétiques dépend de leur charge électrique ; de même l'association de systèmes à des champs morphogénétiques est-elle fonction de leur forme. C'est donc en raison de sa forme caractéristique qu'un champ morphogénétique particulier se constitue autour d'un germe morphogénétique.

Le germe morphogénétique est une partie du système en devenir. Le champ morphogénétique de cette partie du système lui correspond donc. Le reste du champ n'est cependant pas encore « occupé » ou « étoffé » ; il renferme la *forme virtuelle* du système final, lequel ne sera actualisé que lorsque toutes ses parties matérielles se trouveront à leurs places appropriées. Le champ morphogénétique coïncidera alors avec la forme réelle du système.

La Fig. 11 A représente de manière schématique ces processus. Les zones en pointillés indiquent la forme virtuelle et les traits pleins la forme réelle du système. Rien n'interdit de concevoir le champ mor-

phogénétique comme une structure entourant le germe morphogénétique et renfermant la forme finale virtuelle. Ce champ induit alors les événements selon l'étendue de son influence afin d'actualiser la forme virtuelle. Ce champ est indiscernable en l'absence d'unités morphiques qui constituent les parties du système final ; seuls ses effets d'organisation sur ces parties se trouvant sous son influence le révèlent. Les «lignes de force» dans le champ magnétique d'un aimant nous permettent d'établir une analogie ; ces structures spatiales sont mises en évidence quand des particules sujettes au magnétisme telles que la limaille de fer sont introduites dans le voisinage. On peut néanmoins considérer que le champ magnétique existe même en l'absence de limaille de fer ; de la même manière, le champ morphogénétique autour du germe morphogénétique existe en tant que structure spatiale en dépit du fait qu'il n'a pas encore été actualisé dans la forme finale du système. Les champs morphogénétiques diffèrent toutefois radicalement des champs électromagnétiques en ce sens que les derniers dépendent de l'état *réel* du système — de la répartition et du mouvement des particules chargées — alors que les champs morphogénétiques correspondent à l'état potentiel d'un système en développement et sont déjà présents avant qu'il n'ait adopté sa forme finale (1).

La Fig. 11 A montre l'existence de plusieurs stades intermédiaires entre le germe morphogénétique et la forme finale. Cette dernière est également obtenue en empruntant une voie morphogénétique différente (Fig. 11 B) mais lorsqu'une voie particulière est en général suivie, il est possible de la considérer comme un «canal de changement» ou chréode (cf. Fig. 5).

Un système en développement endommagé par le retrait de l'une de ses parties est cependant toujours apte à atteindre sa forme finale (Fig. 11 C). Il s'agit de la régulation.

L'association continue du champ morphogénétique et du système dont la forme finale lui correspond tendront à stabiliser ce dernier après l'actualisation de la forme finale. Toute déviation du système par rapport à cette forme tendra à être corrigée puisque celle-ci attire le système. Et si une partie du système est supprimée, la forme finale tendra à nouveau à être réactualisée (Fig. 11 D). Il s'agit de la régénération.

Le type de morphogenèse représenté par la Fig. 11 relève essentiellement de l'*agrégation* : des unités morphiques précédemment séparées s'associent en une unité morphique d'un niveau supérieur. Un

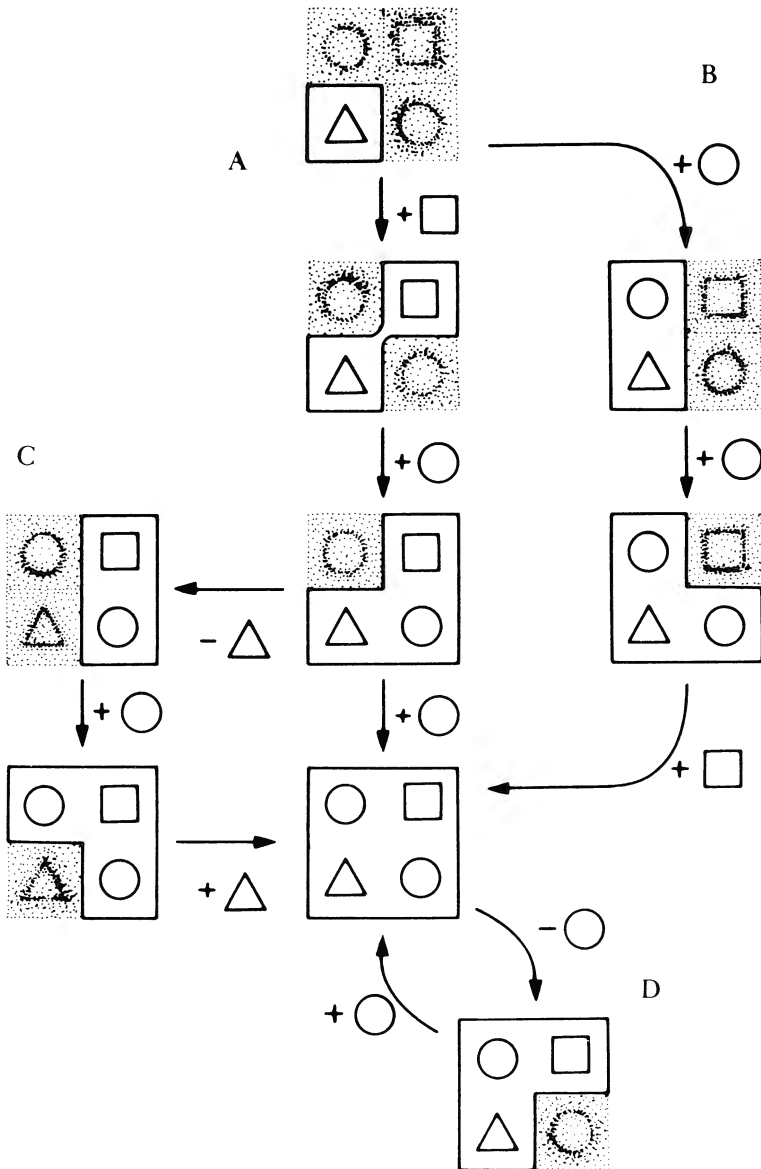


FIGURE N° 11. Représentation schématique du développement d'un système à partir d'un germe morphogénétique (triangle) par la chréode normale, A. Une voie morphogénétique alternative est représentée par B, la régulation par C, et la régénération par D. La zone en pointillés indique la forme virtuelle au sein du champ morphogénétique.

autre type de morphogenèse est possible quand l'unité morphique, qui agit comme le germe morphogénétique, fait déjà partie d'une unité morphique différente d'un niveau supérieur. L'influence du nouveau champ morphogénétique conduit à une *transformation* au cours de laquelle la forme de l'unité morphique originale d'un niveau supérieur est remplacée par celle de la nouvelle. De nombreux types de morphogenèse chimique relèvent de l'agrégation alors que les morphogenèses biologiques impliquent le plus souvent une combinaison de transformation et d'agrégation. Nous étudierons de tels exemples dans les paragraphes suivants.

4.2. La morphogenèse chimique

Des morphogenèses appartenant au type agrégatif se produisent de manière progressive au sein de systèmes inorganiques lorsqu'on abaisse la température : les particules élémentaires s'agrègent pour former des atomes lors du refroidissement du plasma ; à des températures inférieures, les atomes forment des molécules, les molécules se condensent en liquides et en définitive les liquides cristallisent.

A l'état de plasma, les noyaux atomiques dénudés peuvent être considérés comme les germes morphogénétiques des atomes ; ils sont associés aux champs morphogénétiques atomiques, lesquels renferment les orbites virtuelles des électrons. En un sens, ces orbites n'existent pas, mais elles possèdent cependant une réalité qui se révèle dans le plasma refroidissant puisque la capture des électrons les rend effectives.

Les électrons ayant été capturés dans des orbites atomiques sont susceptibles d'être à nouveau séparés de celles-ci par l'influence de l'énergie externe ou par occupation d'une orbite virtuelle d'énergie potentielle inférieure. Ils perdent dans ce cas une partie de leur énergie qui est émise sous forme de photon. Dans les atomes composés de nombreux électrons, chaque orbite ne contient que deux électrons (ayant des spins opposés) ; ainsi dans un plasma refroidissant, les orbites virtuelles ayant les énergies potentielles les plus basses se remplissent d'abord complètement d'électrons, puis les orbites suivantes de moindre énergie et ainsi de suite jusqu'à ce que la forme atomique ait été réalisée autour du germe morphogénétique du noyau.

Les atomes deviennent les germes morphogénétiques des molécules, et les petites molécules les germes de molécules plus grandes. Des réactions chimiques impliquent soit l'agrégation d'atomes et de

molécules dans des molécules plus grandes — par exemple dans la formation des polymères — soit la fragmentation des molécules en molécules plus petites, ou en atomes et en ions, qui sont alors susceptibles de s'assembler avec d'autres comme lors de la combustion : sous l'influence d'énergie externe, des molécules se divisent en atomes et en ions qui se combinent ensuite avec ceux de l'oxygène pour former des molécules plus petites et simples telles que H_2O et CO_2 . Ces modifications chimiques impliquent l'actualisation des formes virtuelles associées aux atomes et aux molécules qui agissent en tant que germes morphogénétiques.

Le fait que de nouveaux composés puissent être « conçus » en premier lieu sur la base de principes de combinaison chimique déterminés empiriquement et que des chimistes organiques les synthétisent ensuite illustre l'idée voulant que des molécules possèdent des formes virtuelles avant d'être réalisées. Ces synthèses effectuées en laboratoire sont conduites progressivement ; à chaque stade, une forme moléculaire particulière sert de germe morphogénétique pour que la prochaine forme virtuelle soit synthétisée et s'achève par la forme de la toute nouvelle molécule.

Ceux qui pensent qu'il est tout à fait artificiel de parler de réactions chimiques en termes de processus morphogénétiques se souviendront à propos que nombre des effets des catalyseurs, tant inorganiques qu'organiques, dépendent de leur morphologie. Ainsi les enzymes, les catalyseurs spécifiques de maintes réactions en biochimie, offrent des surfaces, des gouttières, des rainures ou des cuvettes dans lesquelles les molécules en réaction s'intègrent avec une spécificité souvent comparable à celle de la serrure et de la clef. L'effet catalyseur des enzymes dépend dans une large mesure de la façon dont ils maintiennent les molécules en réaction dans les positions convenables nécessaires pour que la réaction intervienne. (Dans les solutions libres, les rencontres au hasard des molécules se produisent dans toutes les directions possibles, la plupart de celles-ci étant impropres).

Les détails des morphogénèses chimiques sont vagues, en partie à cause de leur grande rapidité, en partie parce que les formes intermédiaires sont parfois très instables et aussi parce que l'échange final consiste en des sauts quantiques probabilistes d'électrons entre les orbitales, lesquels constituent les liens chimiques. La forme virtuelle de la molécule en devenir est esquissée dans le champ morphogénétique associé au germe morphogénétique moléculaire ou atomique ; quand

l'autre atome ou molécule approche dans une orientation correcte, la forme de la molécule produite est réalisée par des sauts quantiques d'électrons dans des orbites qui auparavant n'existaient qu'en tant que formes virtuelles ; l'énergie est en principe libérée simultanément en tant que mouvement thermique. Le rôle du champ morphogénétique dans ce processus est passif sur le plan énergétique et actif sur le plan morphologique ; il crée des structures virtuelles qui sont ensuite réalisées lorsque des unités morphiques de niveau inférieur les « entament » ou les « mordent » en libérant de l'énergie.

N'importe quel type d'atome ou de molécule est susceptible de participer à maints types différents de réaction chimique et il constitue donc le germe potentiel de nombreux champs morphogénétiques différents. Rien n'interdit de considérer qu'il s'agit de possibilités « planant » autour de lui. Il se peut toutefois qu'il ne remplisse pas son rôle en tant que germe d'un champ morphogénétique particulier jusqu'à ce qu'un atome ou une molécule réactifs l'approche, peut-être en raison d'effets électromagnétiques ou autres exercés sur lui par le dernier.

La morphogenèse des cristaux diffère de celles des atomes ou des molécules en ce sens qu'un modèle particulier d'organisation moléculaire ou atomique est répété indéfiniment. Le germe morphogénétique est offert par le modèle lui-même. Nul n'ignore que l'addition de « graines » ou de « noyaux » d'un type de cristal approprié accélère la cristallisation de liquides super-refroidis et de solutions super-saturées. En l'absence de ces graines ou noyaux, les germes morphogénétiques du cristal n'apparaissent que lorsque les atomes ou les molécules adoptent leurs places relatives et appropriées par hasard en raison de l'agitation thermique. Une fois que le germe est présent, les formes virtuelles des répétitions de la structure du réseau produite par le champ morphogénétique s'étendent à l'extérieur des surfaces du cristal croissant. Des atomes ou des molécules libres et appropriés qui s'approchent de ces surfaces sont capturés et « positionnés » ; l'énergie thermique est à nouveau libérée.

L'ensemencement ou la nucléation de liquides super-refroidis ou de solutions super-saturées peuvent également être réalisées, bien qu'avec une efficacité moindre, à l'aide de petits fragments de substances étrangères ; des chimistes grattent souvent les parois des tubes à essai pour semer des solutions avec des fragments de verre. Ceux-ci offrent des surfaces qui facilitent le positionnement relatif et approprié des atomes ou des molécules qui constituent le véritable

germe morphogénétique du cristal. Ces graines ressemblent aux catalyseurs des réactions chimiques dans leur effet morphogénétique.

Tous les types de morphogenèse chimique que nous avons étudiés jusqu'ici relèvent essentiellement de l'agrégation. Les transformations sont beaucoup plus rares dans les systèmes inorganiques. Nombre de cristaux par exemple ne peuvent subir des transformations en d'autres formes cristallines ; ils peuvent être mélangés ou dissous, et leurs constituants peuvent donc participer à d'autres processus de cristallisation. Il s'agit en fait d'une désagrégation qui résulte en de nouveaux types d'agrégation. Des réactions chimiques impliquent de la même manière des changements par désagrégation ou par agglomération. Il existe cependant d'importants exemples de transformation moléculaire, tel que l'enroulement des protéines, et les changements réversibles de formes qui se produisent quand certains enzymes s'assemblent à des molécules dont ils catalysent la réaction. (2)

Le fait que les protéines se replient plus rapidement qu'on ne s'y attendrait si elles « trouvaient » leurs formes finales par une « recherche au hasard » indique que le repliement suit des voies particulières ou un nombre limité de voies (Section 3.3.). Ces « chemine-ments canalisés du changement » peuvent être considérés comme des chréodes. Pour que le processus d'enroulement commence selon les idées développées dans la section 4.1., la présence d'un germe morphogénétique est indispensable et celui-ci doit déjà posséder la structure tridimensionnelle caractéristique qu'il a dans la forme de la protéine. L'existence de tels points de départ morphogénétique a déjà été suggérée dans la littérature concernant l'enroulement protéique :

« L'extrême rapidité de l'enroulement fait qu'il est essentiel que le processus se déroule en un nombre limité de voies, même lorsque les statistiques sont sévèrement restreintes par les types de règles fondamentales stéréochimiques qui sont implicites dans le diagramme de Ramachandran. Il devient nécessaire de postuler l'existence d'un nombre limité d'événements initiateurs admissibles dans le processus de l'enroulement. Ces événements auxquels nous nous référons comme à des nucléations sont plus susceptibles d'intervenir dans des parties de la chaîne polypeptidique qui participent à l'équilibre conformationnel entre des arrangements au hasard et coopérativement stabilisés...

« Il est en outre essentiel de souligner que les séquences d'aci-

des aminés des chaînes polypeptitiques, conçues pour constituer les protéines, n'agissent de manière fonctionnelle que lorsqu'elles sont dans la disposition tridimensionnelle qui les caractérise dans la molécule protéique originale. Rien n'interdit de suggérer que des sections d'une chaîne protéique pouvant servir de sites de nucléation pour l'enroulement seront celles qui possèdent la faculté d'évoluer à l'intérieur et à l'extérieur de la conformation qu'elles occupent dans la protéine finale et qu'elles formeront une structure relativement rigide stabilisée par un ensemble d'interactions » (C.B. Anfinsen) (3).

De tels « sites de nucléation » devraient agir comme des germes morphogénétiques à travers leur association avec le champ morphogénétique de la protéine, qui canaliserait la voie de l'enroulement vers la forme finale caractéristique.

4.3. Les champs morphogénétiques en tant que « structures de probabilité »

Rien n'interdit de considérer que les orbites des électrons autour d'un noyau atomique sont semblables aux structures du champ morphogénétique de l'atome. Certaines solutions de l'équation de Schrödinger permettent de décrire ces orbites. La mécanique quantique argue toutefois de l'impossibilité de définir les orbites des électrons ; seules les probabilités de découvrir des électrons en des points particuliers appartiennent au domaine du possible. Les orbites sont considérées comme des distributions probabilistes dans l'espace. Dans le contexte de la causalité formative, ce résultat suggère que ces structures dans les champs morphogénétiques des atomes doivent être considérées comme des distributions probabilistes spatiales. Il en est de même des champs morphogénétiques qui ne sont donc en général pas décrits avec précision, mais donnés par une distribution probabiliste. (4) Nous pourrions en effet présumer que tel est le cas et nous nous référerions aux structures des champs morphogénétiques comme à des *structures de probabilité*. (5) Une explication concernant la nature probabiliste de ces champs sera avancée dans la section 5.4.

L'action du champ morphogénétique d'une unité morphique sur les champs morphogénétiques de ses parties, qui sont des unités morphiques de niveaux inférieurs (Section 3.4.), peut être considérée en

fonction de l'influence de cette structure de probabilité de niveau supérieur sur les structures de probabilité de niveau inférieur ; le champ de niveau supérieur modifie les structures de probabilité des champs de niveau inférieur. Au cours de la morphogenèse, le champ de niveau supérieur modifie donc la probabilité des événements probabilistes dans les unités morphiques de niveau inférieur placées sous son influence (6).

Dans le cas d'atomes libres, des événements électroniques interviennent avec les probabilités données par les structures de probabilité inchangées des champs morphogénétiques atomiques. Mais quand les atomes tombent sous l'influence du champ morphogénétique de niveau supérieur d'une molécule, ces probabilités sont modifiées de telle façon que la probabilité des événements conduisant à la réalisation de la forme finale est accrue tandis que la probabilité d'autres événements est diminuée. Ainsi les champs morphogénétiques des molécules *restreignent* le nombre possible des configurations atomiques qui auraient été escomptées en se fondant sur des calculs issus des structures de probabilité des atomes libres. Et c'est en fait ce qu'on découvre. Dans le cas de l'enroulement des protéines par exemple, la rapidité du processus indique que le système n'« explore » pas les innombrables configurations selon lesquelles les atomes pourraient être organisés (Section 3.3.)

De la même manière, les champs morphogénétiques des cristaux restreignent le grand nombre d'organisations possibles qui aurait été permis par les structures de probabilité de leurs molécules constituantes ; un modèle particulier d'organisation moléculaire est donc induit lors de la cristallisation de la substance plutôt que toute autre structure concevable.

Les champs morphogénétiques des cristaux et des molécules sont donc des structures de probabilité dans le même sens que les orbitales électroniques dans les champs morphogénétiques des atomes sont des structures de probabilité. Cette conclusion confirme l'affirmation traditionnelle voulant qu'il n'existe pas de différence de nature entre la description de systèmes atomiques simples par la mécanique quantique et une description mécanique quantique potentielle de formes plus complexes. Mais à l'encontre de l'hypothèse de la causalité formative, la théorie conventionnelle tente d'expliquer des systèmes complexes du bas vers le haut, en quelque sorte, en termes de propriétés mécaniques quantiques des atomes.

Un contexte historique permet de mieux saisir la différence entre

ces deux approches. La théorie quantique fut d'abord élaborée en relation avec les propriétés de systèmes simples tels que l'atome d'hydrogène. Au fur et à mesure, de nouveaux principes fondamentaux furent introduits afin d'expliquer des observations empiriques telles que celles concernant la structure du spectre de lumière émis par les atomes. Aux nombres quantiques originaux caractérisant les orbites électroniques abstraites fut ajouté un autre ensemble se référant à la force du moment cinétique et donc au « spin ». Ce dernier est considéré être une propriété irréductible des particules, exactement comme l'est la charge électrique, et posséder sa propre loi de conservation. En physique des particules nucléaires, des facteurs encore plus irréductibles, tels que l'« étrangeté » et le « charme », ainsi que d'autres lois de conservation ont été introduits de manière plus ou moins *ad hoc* afin d'expliquer des observations par ailleurs inexplicables en termes de facteurs quantiques déjà acceptés. La découverte de grands nombres de nouvelles particules élémentaires a en outre conduit à formuler le postulat d'un nombre sans cesse croissant de nouveaux types de champs de matière.

Alors que maints nouveaux principes et champs physiques ont été introduits afin d'expliquer les propriétés des atomes et des particules élémentaires, la présomption conventionnelle voulant qu'aucun nouveau principe physique ou champ ne joue un rôle aux niveaux de l'organisation au-dessus de celui de l'atome semble tout à fait arbitraire. Il s'agit en fait d'une réminiscence de l'atomisme du XIX^e siècle ; sa justification théorique individuelle s'est évanouie du fait que de nos jours nous ne considérons plus que les atomes sont ultimes et indivisibles. L'hypothèse de la causalité formative soutient que la théorie quantique ne permet pas d'extrapoler pour décrire les champs morphogénétiques de systèmes plus complexes bien que le corps existant développé en relation avec les propriétés des atomes, des molécules et des particules subatomiques éclaire d'un jour nouveau la nature des champs morphogénétiques. Il n'existe aucune raison d'avancer que les champs morphogénétiques des atomes possèdent une position privilégiée dans l'ordre de la nature ; ils ne sont que les champs d'unité morphique à un niveau donné de complexité.

4.4. Processus probabilistes dans la morphogenèse biologique

Maints exemples de processus physiques existent dont les conséquences sont probabilistes. D'une manière générale, des change-

ments impliquant la rupture d'une symétrie ou homogénéité sont indéterminés ; des exemples interviennent au cours des phases de transition entre les états gazeux et liquide et entre les états liquide et solide. Si par exemple un ballon sphérique rempli de vapeur est refroidi au-dessous du point de saturation en l'absence de gradients externes de température et de gravité, le liquide se condense tout d'abord sur les parois, mais la répartition finale du liquide est imprévisible et pratiquement jamais symétrique par rapport à la sphéricité. (7) Sur un plan thermodynamique, les quantités relatives de liquide et de vapeur sont prévisibles mais pas leur répartition spatiale. Lors de la cristallisation d'une substance en des conditions semblables, la répartition spatiale et les nombres et les tailles des cristaux sont imprévisibles ; en d'autres termes, si le même processus était répété sous des conditions identiques à chaque fois le résultat spatial différerait en ce qui concerne les détails.

Les formes des cristaux elles-mêmes, bien qu'elles présentent une symétrie précise, sont parfois indéterminées ; un exemple familier nous est offert par les flocons de neige qui brillent par leurs différences de conformation (8).

Dans les « structures de dispersion » de systèmes macroscopiques physiques et chimiques éloignés de l'équilibre thermodynamique, des fluctuations au hasard engendrent parfois des modèles spatiaux, par exemple des cellules de convection dans un liquide chauffé ou des bandes colorées dans des solutions dans lesquelles on réalise la réaction de Zhabotinski. Les descriptions mathématiques de tels cas de « fluctuations à travers l'ordre » par les méthodes thermodynamiques non équilibrées montrent des analogies frappantes avec les transitions de phase. (9)

Ces exemples d'indéterminisme spatial sont issus de processus physiques et chimiques très simples. Dans les cellules vivantes, la complexité de systèmes physico-chimiques est de beaucoup supérieure à toutes celles rencontrées dans le règne inorganique ; de nombreuses transitions de phase potentiellement indéterminées et maints processus thermodynamiques non équilibrés y interviennent. Dans le protoplasme, il y a des phases cristallines, liquides et lipidiques en interrelation dynamique ; viennent ensuite de nombreux types de macro-molécules qui s'assemblent en des agrégats cristallins ou quasi-cristallins, des membranes de lipides qui, tels des « cristaux liquides », évoluent à la frontière entre les états liquide et solide à la manière des solutions et des gels colloïdaux, des potentiels électriques

à travers des membranes qui fluctuent de manière imprévisible et des « compartiments », contenant différentes concentrations d'ions inorganiques et d'autres substances, séparés par des membranes à travers lesquelles ces substances se meuvent de façon probabiliste. (10) Une telle complexité fait que le nombre de modèles de changement énergétiquement possibles est considérable et il existe donc un vaste éventail pour l'opération des champs morphogénétiques via la disposition des modèles sur ces processus probabilistes.

Ceci ne signifie pas que *toute* forme dans les organismes vivants soit déterminée par la causalité formative. Certains modèles résultent du hasard. D'autres sont tout à fait explicables en termes de configuration d'énergie minimum : ainsi la forme sphérique de cellules d'œuf flottant librement (celles des oursins) peut-elle être expliquée en termes de tension à la surface de la membrane cellulaire. Le succès très limité des explications physiques simples des formes biologiques (11) suggère cependant que maints aspects de la morphogenèse biologique sont déterminés par des champs morphogénétiques. Il importe de répéter que ces champs n'agissent pas seuls mais de concert avec les causes énergétiques et chimiques étudiées par les biophysiciens et par les biochimistes.

Un exemple du mode opératoire des champs morphogénétiques dans les cellules nous est fourni par le positionnement des microtubules, des structures évoquant de minuscules bâtonnets formées par l'agglomération spontanée de sous-unités protéiques. Les microtubules jouent un rôle important en tant qu'« échafaudages » microscopiques tant dans les cellules animales que végétales : ils guident et orientent des processus tels que la division cellulaire (les fibres du fuseau au moment des mitoses et des méioses sont constituées de microtubules) et la disposition du matériel de la paroi cellulaire, en différenciant les cellules végétales ; ils servent également de « squelettes » intra-cellulaires, en maintenant des formes cellulaires particulières comme chez les radiolaires. (12) Qu'est-ce qui contrôle donc la répartition spatiale des microtubules si celle-ci est responsable du modèle de maintes sortes de processus et de structures dans les cellules ? Avancer que d'autres modèles d'organisation pourraient être responsables (13) revient à repousser le problème d'une étape : qu'est-ce qui contrôle ces modèles d'organisation ? Mais il est impossible de repousser le problème indéfiniment puisque le développement est épigénétique, ce qui revient à dire qu'il implique une augmentation dans la diversité et l'organisation spatiale inexplicables en

termes de structures ou de modèles antérieurs ; autre chose devra tôt ou tard expliquer l'émergence du modèle au sein duquel s'agglomèrent les microtubules.

L'hypothèse présente veut que ce modèle soit dû à l'action des champs morphogénétiques spécifiques. Ces champs augmentent considérablement la probabilité de l'agrégation de microtubules dans les dispositions correctes, soit directement soit indirectement, à travers l'établissement d'un modèle antérieur d'organisation. L'activité modelante des champs dépend évidemment de la présence d'une solution sursaturée de sous-unités constituant les microtubules dans la cellule et de conditions physico-chimiques convenables pour la formation de microtubules, mais ces réquisits ne suffisent pas en eux-mêmes à expliquer le modèle dans lequel les microtubules apparaissent.

D'aucuns objecteront que l'action suggérée de la causalité formative dans des processus modelants et probabilistes dans les cellules est impossible parce qu'elle conduirait à une violation locale du second principe de la thermodynamique. Mais cette objection n'est pas valable. Le second principe de thermodynamique ne se réfère qu'à des assembléments de très grands nombres de particules et non aux processus intervenant à l'échelle microscopique. En outre, il s'applique essentiellement aux systèmes fermés : une région d'une cellule n'est pas un système fermé pas plus que ne le sont les organismes vivants en général.

Dans les organismes vivants comme dans le domaine chimique, les champs morphogénétiques sont organisés hiérarchiquement : ceux des organites — par exemple le noyau cellulaire, les mitochondries et les chloroplastes — agissent en ordonnant les processus physico-chimiques en leur sein ; ces champs sont sujets à des champs de niveaux supérieurs des cellules ; les champs de cellules à ceux des tissus ; ceux des tissus à ceux des organes ; et ceux des organes aux champs morphogénétiques de l'organisme en tant que tout. Les champs fonctionnent à chaque niveau en ordonnant des processus qui autrement seraient indéterminés. Ainsi au niveau cellulaire, les champs morphogénétiques ordonnent la cristallisation de microtubules et d'autres processus nécessaires à la coordination de la division cellulaire. Mais les plans dans lesquels les cellules se divisent sont parfois indéterminés en l'absence d'un champ de niveau supérieur : par exemple, chez les plantes blessées, les cellules prolifèrent plus ou moins au hasard pour produire une masse chaotique et calleuse. (14)

Dans un tissu organisé au contraire, une des fonctions du champ morphogénétique du tissu consiste parfois à imposer un modèle au plan de la division cellulaire et donc à contrôler la façon selon laquelle le tissu se développe en tant que tout. Le développement des tissus peut, à maints égards, être lui-même indéterminé de manière inhérente, ainsi que le révèlent leur isolement et leur croissance artificielles dans une culture de tissus (15) ; le champ d'un niveau supérieur de l'organe limite cet indéterminisme en des conditions normales. En fait à chaque niveau dans les systèmes biologiques comme dans les systèmes chimiques, les unités morphiques en isolement se comportent avec un indéterminisme plus grand qu'elles ne le font lorsqu'elles sont partie d'une unité morphique de niveau supérieur. Le champ morphogénétique de niveau supérieur restreint et modèle leur indéterminisme intrinsèque.

4.5. Les germes morphogénétiques dans des systèmes biologiques

Au niveau cellulaire, les germes pour les transformations morphogénétiques doivent être des unités morphiques de niveau inférieur à l'intérieur des cellules présentes tant au commencement qu'à la fin du processus de différenciation cellulaire. Les germes morphogénétiques de ces transformations ne sont pas évidents de prime abord : il s'agira selon les cas d'organites, d'agrégats macromoléculaires, de structures cytoplasmiques ou membranaires ou encore du noyau cellulaire. Ce dernier tient souvent ce rôle. Mais puisque tant de types différents de cellules différenciées sont susceptibles d'être produits au sein d'un même organisme, si les noyaux sont destinés à agir en tant que germes morphogénétiques, ils doivent être capables de réaliser différents modèles d'organisation dans différents types de cellules : la différenciation cellulaire doit être précédée de la différenciation du noyau cellulaire, grâce au changement dans sa membrane, grâce au réarrangement de ses chromosomes, grâce au nucléole ainsi qu'à d'autres composants. De telles modifications sont favorisées soit indirectement soit directement grâce à l'action d'un champ morphogénétique de niveau supérieur à celui des tissus en voie de différenciation. Il est évident que maints types de différenciation cellulaire sont précédés de modifications nucléaires. La suggestion avancée ici diverge de l'interprétation habituelle de ces changements en considérant que leur signification n'est pas simplement chimique, autorisant la production de types spéciaux d'ARN messager, mais

encore qu'elle est morphogénétique : les noyaux modifiés sont susceptibles de servir de germes auxquels s'associent les champs morphogénétiques spécifiques de cellules différenciées. (16)

Il existe au moins un processus de morphogenèse cellulaire au cours duquel le noyau ne peut pas être le germe morphogénétique : la division nucléaire. Il perd son identité en tant que structure indépendante lorsque la membrane nucléaire se rompt et disparaît. (17) Les chromosomes hautement condensés et dédoublés s'alignent dans la région équatoriale du fuseau mitotique et un ensemble complet se déplace alors vers chaque pôle. Les nouvelles membranes nucléaires se développent ensuite autour de chaque ensemble de chromosomes pour former des noyaux fils. Il est impératif que les germes morphogénétiques de ces processus soient des structures extra-nucléaires ou des organites et qu'ils soient deux. (18)

Le développement des tissus et des organes implique en général des changements aux niveaux de la transformation et de l'agrégation. Dans ces morphogenèses, les germes morphogénétiques doivent être des cellules ou des groupes de cellules qui sont présentes tant au commencement qu'à la fin du processus. Elles ne seront en aucun cas des cellules spécialisées puisque celles-ci n'apparaissent que lorsque le processus est engagé. Les germes morphogénétiques seraient donc des cellules relativement non spécialisées et subissant peu de changement. De telles cellules sont présentes chez les végétaux supérieurs par exemple dans les zones apicales des méristèmes ou points de croissance. (19) Dans les pousses, le stimulus favorisant la floraison transforme les méristèmes afin qu'ils donnent naissance à des fleurs plutôt qu'à des feuilles ou qu'à d'autres structures végétatives ; les zones apicales, modifiées comme il se doit par le stimulus favorisant la floraison, pourraient être les germes morphogénétiques nécessaires à cette transformation. Chez les embryons animaux, de nombreux « centres organisateurs » jouant un rôle clef dans le développement des tissus et des organes ont déjà été identifiés par des embryologistes expérimentaux ; l'arrête apicale ectodermique à l'extrémité du bourgeon des membres en développement en constitue un exemple. (20) Ces « centres organisateurs » pourraient être les germes avec lesquels les champs morphogénétiques fondamentaux s'associent.

Bien qu'il soit possible de suggérer, à défaut d'identifier, des germes morphogénétiques aussi bien dans le domaine chimique que biologique, maintes choses demeurent obscures, en particulier la raison de la forme spécifique de chaque champ morphogénétique et la

manière selon laquelle il s'associe à son germe. L'étude de ces problèmes dans le prochain chapitre débouche sur la formulation d'une hypothèse plus complète de la causalité formative et il est possible que celle-ci soit plus facile à comprendre en dépit de sa surprenante nouveauté.

NOTES

(1) L'assimilation des champs morphogénétiques aux champs électromagnétiques est source de confusion dans la théorie de l'électrodynamisme « *Life Fields* » de H.S. Burr. Celui-ci (1972) avance un argument irréfutable prouvant que les organismes vivants sont associés aux champs électromagnétiques, lesquels changent au même titre que les organismes, mais il poursuit en affirmant que ces champs contrôlent la morphogenèse en agissant comme des « empreintes » pour le développement, ce qui est une tout autre question.

(2) Cf Williams (1979) en ce qui concerne la littérature sur les modifications de la conformation des protéines en solution.

(3) Anfinsen (1973).

(4) Cf Suppes (1970) pour une discussion générale de la causalité probabiliste.

(5) Cf Sir Karl Popper pour le concept de champs de probabilité et de propension (Popper, 1967 ; Popper et Eccles, 1977).

(6) Cette suggestion pourrait satisfaire l'approche de la physique quantique préconisée par Bohm (1969, 1980) et Hiley (1980).

(7) Cet exemple — et maints autres — de ce que R. Thom nomme « catastrophes généralisées » est discuté dans le chapitre 6 de son livre « *Stabilité structurelle et morphogenèse* ».

(8) Bentley et Humphreys (1962).

(9) Voir Nicolis et Prigogine (1977). Haken (1977) souligne une approche différente quoique voisine de ces problèmes.

(10) Stevens (1977).

(11) Sir d'Arcy Thompson dans son essai classique *On Growth and Form* (1942) suggère que maints aspects de la morphogenèse biologique pourraient être expliqués en termes de forces physiques : le plan de la division cellulaire en termes de tension de surface, ce qui tendrait à donner une zone de surface minimum. Mais il existe tant d'exceptions que ces interprétations simples n'ont rencontré que très peu de succès. Cf. Medawar (1968) pour une discussion des théories de Thompson.

(12) Cf Dustin (1978) et Roberts et Hyams (1979) en ce qui concerne des rapports récents quant aux propriétés et aux fonctions des microtubules.

(13) Une hypothèse veut que le réticule endoplasmique lisse joue un rôle dans le transport des sous-unités des microtubules vers les régions où ils s'agrègent (Burgess et Northcote, 1968). L'existence d'« éléments s'assemblant en noyau » qui puissent ou ne puissent pas être unis dans des « centres organisateurs des microtubules » a également été suggérée (J.B. Tucker, in Roberts et Hyams, 1977).

(14) Street & Henshaw (1965).

(15) Cf Willmer (1970) pour des exemples.

(16) Dans certains exemples, les noyaux sont détruits aux stades terminaux de la différenciation (ainsi les vaisseaux xylèmes chez les végétaux, les globules rouges chez les mammifères). Dans ces cas, les noyaux peuvent agir en tant que germes morphogénétiques pour le processus de différenciation, et ceci aussi longtemps qu'ils demeureront intacts ; les derniers stades de la différenciation interviendraient ensuite de manière purement mécanique directement par des processus chimiques non soumis à un ordre morphogénétique via la libération d'enzymes hydrolytiques.

(17) Chez certaines algues, par ex. l'*Oedogonium*, la membrane nucléaire demeure intacte durant la mitose ; il s'agit probablement d'une caractéristique évolutionnaire primitive (Pickett-Heaps, 1975).

(18) Dans le règne animal, les centrioles semblent susceptibles d'être candidats pour ce rôle, mais les végétaux supérieurs n'en possèdent pas. Dans les deux cas, des « centres organisateurs des microtubules » pourraient porter la responsabilité du développement des pôles fuseaux ; les centrioles pourraient n'être que des « passagers » assurés d'une participation égale dans les cellules filles par association avec ces centres (Pickett et Heaps, 1979). Les centrioles servent de centres organisateurs ou de germes morphogénétiques pour le développement des cils vibratoires et des flagelles.

(19) Clowes (1961).

(20) Wolpert (1978).

CHAPITRE 5

L'INFLUENCE DES FORMES ANTÉRIEURES

5.1. La constance et la répétition des formes

Au fur et à mesure que les atomes apparaissent, les électrons remplissent les mêmes orbites autour des noyaux ; les atomes se combinent de manière répétitive pour produire les mêmes formes moléculaires ; les molécules cristallisent encore et toujours dans les mêmes modèles spatiaux ; des graines d'une espèce donnée engendrent année après année des végétaux ayant la même apparence ; des araignées tissent génération après génération les mêmes types de toiles. Les formes sont sans cesse reproduites et chaque forme est toujours plus ou moins constante. C'est de ce fait que dépend notre capacité à reconnaître, à identifier et à nommer les choses.

Cette constance et cette répétition ne poseraient pas problème si toutes les formes étaient essentiellement déterminées par des lois physiques ou par des principes immuables. Ce postulat est implicite dans la théorie traditionnelle de la causalité de la forme. On considère que ces principes physiques fondamentaux sont temporairement antérieurs aux formes réelles des choses : sur le plan théorique, la manière dont un corps chimique récemment synthétisé cristallisera devrait être calculable avant la première apparition de ses cristaux ; de la même manière, les effets d'une mutation donnée dans l'ADN d'un animal ou d'un végétal sur la forme de l'organisme devraient être prévisibles. Il est évident que de tels calculs n'ont jamais été réalisés. Cette belle hypothèse, qui n'est pas vérifiée, est très certainement invérifiable.

Selon l'hypothèse de la causalité formative, les formes des corps chimiques complexes et des systèmes biologiques ne sont au contraire pas uniquement déterminées par des lois physiques connues. Ces lois autorisent un éventail d'alternatives entre lesquelles les causes formatives choisissent. La constance et la répétition des formes sont expliquées par l'association répétée du même type de champ morphogénétique et d'un type donné de système physico-chimique. Mais qu'est-ce qui détermine la forme particulière d'un champ morphogénétique ?

Une des réponses possibles consiste à avancer que les champs morphogénétiques sont éternels. Ils existent et sont inexplicables en quelque terme que ce soit. Ainsi avant l'apparition de cette planète, les champs morphogénétiques de tous les corps chimiques, ceux de tous les cristaux, ceux de tous les animaux, ceux de tous les végétaux qui sont jamais apparus sur la terre ou qui y apparaîtront jamais, existaient déjà à un état latent.

Cette réponse est essentiellement platonicienne, voire aristotélicienne en ce sens qu'Aristote croyait en la fixité éternelle des formes spécifiques. Elle diverge de la théorie physique traditionnelle puisqu'elle ne reconnaît pas le fait que ces formes seraient prévisibles en termes de causalité énergétique ; mais toutes deux s'accordent à reconnaître que des principes préexistants d'ordre sous-tendent tous les phénomènes empiriques.

L'autre réponse possible diffère de manière radicale. Les formes biologiques et chimiques sont répétées non pas parce qu'elles sont déterminées par des lois immuables ou par des Formes éternelles mais en raison d'une *influence causale de formes similaires antérieures*. Cette influence requerrait une action à travers l'espace *et le temps* à l'encontre de tout type connu d'action physique.

Selon cette optique, la forme unique adoptée par un système ne serait pas physiquement déterminée avant sa première apparition. Elle serait néanmoins répétée parce que la forme du premier système elle-même déterminerait la forme de systèmes semblables subséquents. Imaginons par exemple qu'un système soit issu de plusieurs formes possibles P, Q, R, S..., toutes étant également probables d'après un point de vue énergétique, et qu'il adopte la forme R à la première occasion. Des systèmes semblables revêtiront en des occasions ultérieures la forme R en raison de l'influence transpatiale et trans-temporelle de ce premier système.

Qu'est-ce qui détermine la forme à l'origine ? Nul ne peut fournir

une réponse scientifique : la question concerne des événements uniques et énergétiquement indéterminés, lesquels, *ex hypothesi*, une fois qu'ils sont advenus ne peuvent être répétés puisqu'ils influencent tous les événements subséquents de même nature. La science s'intéresse essentiellement à la constance et aux phénomènes répétitifs. Le choix initial d'une forme particulière est imputable au hasard, ou à une créativité inhérente à la matière, ou encore à une opération créative transcendante. Mais aucun moyen expérimental n'existe pour distinguer ces différentes possibilités les unes des autres. Le choix ne se fonde que sur des critères métaphysiques. Cette question est abordée dans le dernier chapitre de ce livre, mais en ce qui concerne notre discussion, il importe peu de savoir quelle possibilité a été retenue. L'hypothèse de la causalité formative s'intéresse essentiellement à la *répétition* des formes et non aux raisons de leur apparition originale.

Ce nouveau mode de pensée n'est pas familier et il conduit en un territoire vierge. Mais cette seule exploration laisse supposer l'existence d'un espoir de parvenir à une compréhension scientifique nouvelle de la forme et de l'organisation en général et des organismes vivants en particulier. Si nous refusons d'aller de l'avant, la seule alternative consiste à retourner au point de départ. Il conviendrait d'opter à nouveau entre une simple croyance mécaniste et un organicisme métaphysique.

La discussion suivante propose que cette influence hypothétique trans-spatiale et trans-temporelle passe par les champs morphogénétiques et il s'agit d'une caractéristique essentielle de la causalité formative.

5.2. La possibilité générale des connexions causales trans-temporelles

L'hypothèse de la causalité formative a proposé une nouvelle sorte de connexion causale trans-temporelle que la science n'a pas encore reconnue alors que plusieurs philosophes ont envisagé la possibilité d'une « action à distance » dans le temps. Cela ne semble pas constituer une raison *a priori* pour l'exclure. J.L. Mackie écrit :

« Nous nous satisfaisons des relations de cause à effet contingents, mais nous trouvons surprenante l'idée d'une « action à distance » à travers un espace spatial ou temporel et cependant nous ne l'écartons pas. Notre concept ordinaire de la causalité ne requiert pas de manière absolue la contiguïté ; dire que « C a

provoqué E à travers un intervalle spatial ou temporel, sans liens intermédiaires », n'est pas une contradiction en soi selon notre concept de la causalité ». (1)

En outre rien n'interdit de considérer de nouveaux types de connexions causales selon le point de vue de la philosophie de la science :

« La théorie scientifique ne présuppose en général aucun mode particulier de connexion causale entre des événements, mais seulement la possibilité de découvrir des lois et des hypothèses exprimées en termes de modèles qui satisfassent le critère d'intelligibilité, de confirmation et le principe de falsification. Le mode de connexion causale dans chaque cas est montré par le modèle et change en fonction des modifications fondamentales de celui-ci ». (M.B. Hesse) (2).

Cependant le caractère plausible de l'hypothèse de la causalité formative ne sera établi que lorsque des prévisions en découlant auront été vérifiées empiriquement, bien que le nouveau type de connexion causale qu'elle propose soit en principe possible.

5.3. La résonance morphique

Il est difficile d'exprimer en fonction des concepts existants l'idée d'un processus par lequel les formes de systèmes antérieurs influenceraient la morphogenèse de systèmes semblables subséquents. La seule façon de procéder est de recourir à l'analogie.

L'analogie physique qui semble la plus appropriée est celle de la *résonance*. La résonance énergétique intervient quand une force alternative, qui correspond à la fréquence naturelle de vibration d'un système, agit sur celui-ci. Citons à titre d'exemples : la vibration « sympathique » de cordes tendues en réponse à des ondes sonores appropriées ; l'accord des postes de radio à la fréquence des ondes radio émises par les émetteurs ; l'absorption des ondes lumineuses de fréquences particulières par des atomes et par des molécules résultant en un spectre d'absorption caractéristique ; et la réaction des électrons et des noyaux atomiques en présence de champs magnétiques à la radiation électromagnétique dans la « résonance du spin électronique » et dans la « résonance magnétique nucléaire ». Le principe de sélectivité est commun à tous ces types de résonance : immergés dans

un mélange de vibrations des plus complexes, les systèmes ne répondent qu'à celles de fréquences particulières.

Un effet « résonant » d'une forme sur une autre à travers l'espace et le temps ressemblerait à la résonance énergétique dans sa sélectivité, mais aucun type connu de résonance ne permettrait de l'expliquer et il n'impliquerait pas non plus une transmission d'énergie. Nous nommerons ce processus *résonance morphique* afin de le distinguer de la résonance énergétique.

La résonance morphique est analogue à la résonance énergétique à un autre égard : elle se déroule entre des systèmes vibratoires. Les atomes, les molécules, les cristaux, les organites, les cellules, les tissus, les organes et les organismes sont tous constitués de parties en oscillation incessante, et tous possèdent leurs propres modèles caractéristiques de vibration et de rythmes internes ; les unités morphiques sont dynamiques et non pas statiques. (3) La résonance morphique dépend de modèles tridimensionnels de vibration alors que la résonance énergétique dépend essentiellement de la spécificité de réaction à des fréquences particulières, à des stimuli « unidimensionnels » (4). Nous suggérons donc ici que via la résonance morphique la forme d'un système, y compris sa structure interne caractéristique et ses fréquences vibratoires, se manifeste dans un système ultérieur doté d'une forme similaire ; le modèle spatio-temporel du premier se *superpose* au dernier.

La résonance morphique intervient dans les champs morphogénétiques et engendre en fait leurs structures caractéristiques. Un champ morphogénétique spécifique influence non seulement la forme d'un système (Cf chapitre précédent), mais encore la forme de ce système influence le champ morphogénétique et à travers lui se manifeste dans des systèmes similaires subséquents.

5.4. L'influence du passé

La résonance morphique est non-énergétique et les champs morphogénétiques eux-mêmes ne sont ni un type de masse ni un type d'énergie. Cela n'explique pas *a priori* la raison pour laquelle elle obéirait aux lois s'appliquant aux corps, aux particules et aux ondes. En particulier, elle n'est pas nécessairement atténuée par la séparation, qu'elle soit spatiale ou temporelle, existant entre des systèmes semblables ; elle sera tout aussi efficace à dix mille kilomètres qu'à un mètre, en un siècle qu'en une heure.

Par souci de simplicité, nous adopterons temporairement comme hypothèse de travail le postulat voulant que le temps et l'espace n'atténuent pas la résonance morphique.

Nous présumerons également, et pour la même raison, que la résonance morphique est essentiellement issue du *passé*, que seules les unités morphiques ayant déjà existé sont capables d'exercer une influence morphique dans le présent. La notion affirmant que des systèmes *futurs*, qui n'existent pas encore, puissent être capables d'exercer une influence causale « rétroactive » pourrait être concevable en toute logique (5), mais on ne considérerait avec sérieux cette éventualité que s'il existait une preuve empirique convaincante de l'influence physique d'unités morphiques futures. (6)

Comment se déroule la résonance morphique si l'on présume qu'elle se produit essentiellement à partir d'unités morphiques antérieures et que ni le temps ni l'espace ne l'atténuent ? Nous visualiserons ce processus en ayant recours à plusieurs métaphores. L'influence morphique d'un système antérieur se manifestera dans un système semblable subséquent en passant « au-delà » de l'espace-temps, puis en y « rentrant » partout et à chaque fois qu'un modèle semblable de vibration apparaîtra. Elle pourrait également être connectée à d'autres « dimensions ». Elle pourrait traverser un « tunnel » spatio-temporel et émerger en présence d'un système similaire subséquent. L'influence morphique des systèmes antérieurs pourrait être simplement présente partout. Il est probable cependant que l'expérimentation ne permettrait pas de distinguer entre ces différentes approches de la résonance morphique. Toutes présenteraient les mêmes conséquences : les formes des systèmes antérieurs se manifesteraient automatiquement dans des systèmes semblables et subséquents.

Cette hypothèse implique de manière immédiate que tel système est influencé par *tous* les systèmes passés dotés d'une forme et d'un modèle vibratoire semblables. *Ex hypothesi* l'influence de ces systèmes passés n'est pas minimisée par la séparation temporelle ou spatiale. Néanmoins, l'action serait susceptible d'épuiser ou d'affaiblir la faculté des systèmes subséquents, et ils ne pourraient disposer que de l'influence potentielle limitée, dispensée dans la résonance morphique. Cette éventualité est discutée dans la section suivante. Mais considérons tout d'abord que leur action potentielle n'est pas réduite de cette façon ; il en résulte que les formes de tous les systèmes antérieurs influencent tous les systèmes semblables subséquents (Fig. 12).

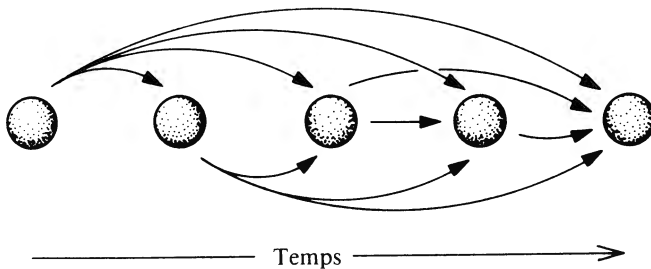


FIGURE N° 12. Graphique illustrant l'influence cumulative de systèmes passés sur des systèmes semblables et subséquents par résonance morphique.

Ce postulat implique plusieurs conséquences importantes :

1) Le premier système doté d'une forme donnée influence le second présentant la même nature, le premier et le second systèmes influencent ensuite le troisième et ainsi de suite de manière cumulative. L'influence directe de n'importe quel système subséquent est atténuée de manière progressive au fil du temps dans ce processus. Son effet absolu ne diminue pas, mais son effet *relatif* s'amointrit au fur et à mesure que le nombre total de systèmes antérieurs semblables augmente (Fig. 12).

2) Les formes des unités morphiques chimiques, y compris les plus simples, sont variables : les particules élémentaires sont sans cesse en mouvement vibratoire, et les atomes et les molécules sont sujets à la déformation due à la collision mécanique et aux champs électrique et magnétique. Les unités morphiques biologiques sont encore plus variables ; il est improbable que des cellules et des organismes soient en tout points identiques, même s'ils possèdent la même constitution génétique et se développent dans les mêmes conditions.

La résonance morphique fait que les formes de tous les systèmes antérieurs similaires se manifestent dans un système subséquent de même forme. Même en supposant que des différences en taille absolue soient ajustées (Cf Section 6.3.), nombre de ces formes différeront les unes des autres en ce qui concerne les détails. Elles ne coïncideront donc pas exactement entre elles lorsque la résonance morphique les superposera les unes aux autres. Il en résultera un processus automatique d'ajustement à la moyenne qui renforcera les caractéristiques communes à nombre de systèmes antérieurs. Cette forme « équilibrée » ne sera pas définie avec précision dans le champ mor-

phogénétique, mais entourée d'un « brouillard » dû à l'effet de déviations moins communes.

Une analogie avec les « photographies composées » réalisées en superposant les images photographiques de différents individus permettra de mieux visualiser ce processus. Il résulte de cette méthode que les traits communs sont renforcés, mais les photographies « équilibrées » ne sont pas définies avec une grande exactitude en raison des différences entre les images individuelles (Fig. 13 et 14).

3) Cet ajustement automatique à la moyenne issue des formes antérieures aboutira à une répartition de probabilité spatiale dans le champ morphogénétique ou en d'autres termes en une *structure de probabilité* (Cf Section 4.3.).

La structure de probabilité d'un champ morphogénétique détermine l'état probable d'un système donné se trouvant sous son influence en accord avec les états *réels* de tous les systèmes semblables antérieurs ; la forme que le système adoptera sera celle qui est intervenue le plus souvent auparavant.

4) Dans les premiers stades de l'histoire de la forme, le champ morphogénétique sera relativement mal déterminé et des déviations individuelles l'influenceront de manière significative. Mais au fil du temps, l'influence cumulative d'innombrables systèmes précédents confèrera une stabilité sans cesse croissante au champ ; plus le type équilibré deviendra probable plus il sera susceptible d'être répété à l'avenir.

En d'autres termes : le bassin d'attraction du champ morphogénétique sera d'abord relativement peu profond, puis il s'approfondira lorsque le nombre de système participant à la résonance morphique s'accroîtra. Ou pour utiliser une autre métaphore, la forme creusera une ornière par la répétition et plus elle sera répétée plus l'ornière s'approfondira.

5) L'impact de l'influence que possède un système donné sur des systèmes semblables et subséquents semble susceptible de dépendre de sa durée de vie : un système qui existe encore au bout d'un an aura parfois plus d'effet que celui qui se désintègre au bout d'une seconde. Cet ajustement automatique à la moyenne penche donc parfois en faveur des formes précédentes anciennes.

6) Au commencement d'un processus morphogénétique, le germe morphogénétique entre en résonance morphique avec des systèmes antérieurs semblables qui sont parties d'unités morphiques de niveau supérieur : il s'associe donc au champ morphogénétique d'une unité



FIGURE N° 13.



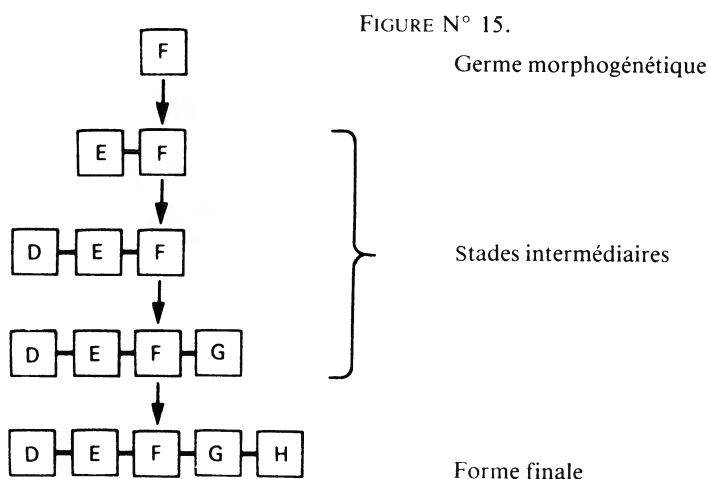
FIGURE N° 14.

morphique de niveau supérieur (Section 4.1.). Représentons le germe morphogénétique par l'unité morphique F et la forme finale vers laquelle tend le système par D-E-F-G-H. Les stades intermédiaires dans la morphogenèse sont tels que présentés par la Figure 15. Le germe morphogénétique et les stades intermédiaires entrent non seulement en résonance morphique avec la forme *finale* de systèmes semblables précédents, mais encore les stades intermédiaires entrent

en résonance morphique avec les stades intermédiaires semblables E-F, D-E-F, etc. des morphogenèses similaires précédentes. Ces stades seront donc stabilisés par la résonance morphique résultant en une chréode. Plus cette voie particulière de morphogenèse est empruntée, plus cette chréode sera renforcée. Pour reprendre les termes du modèle du « paysage épigénétique » (Fig. 5), nous dirons que plus le développement empruntera cette voie, plus la vallée de la chréode s'approfondira.

5.5. Implications d'une résonance morphique atténuée

La discussion précédente se fondait sur l'hypothèse voulant que l'influence morphique d'un système donné n'épuise pas son action sur des systèmes semblables et subséquents, bien que son effet *relatif* soit amoindri au fur et à mesure de l'augmentation du nombre des systèmes semblables. Nous étudions à présent l'hypothèse inverse, c'est-à-dire celle envisageant que cette influence soit quelque peu amoindrie.



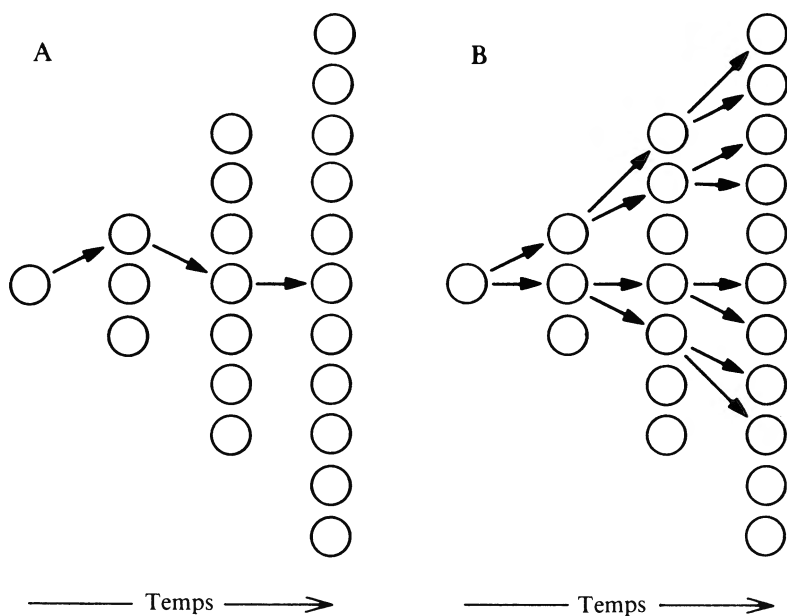
Graphique représentant les stades de la morphogenèse par agrégation de l'unité morphique D-E-F-G-H à partir du germe morphogénétique F.

Un tel épuisement ne serait discernable qu'à la condition expresse qu'il intervienne de manière très rapide. Etudions en premier lieu le cas extrême dans lequel l'influence d'un système est consommée par

la résonance morphique avec un seul système subséquent. L'augmentation dans le temps du nombre de systèmes semblables implique que maints d'entre eux ne subiront pas l'influence de la résonance morphique des systèmes semblables antérieurs (Fig. 16 A). Ils seront libres en conséquence d'adopter différentes formes par « hasard » ou par « créativité » ; les formes de ces systèmes pourront donc être des plus variables.

Etudions le cas dans lequel chaque système influence deux systèmes subséquents. Dans la situation représentée par la figure 16 B, de nombreuses formes subséquentes — mais pas toutes — seraient stabilisées par la résonance morphique. Si chaque système influence trois systèmes subséquents, toutes seront stabilisées ; une instabilité dans la forme n'apparaîtrait que si une augmentation encore plus rapide du nombre de systèmes semblables et subséquents intervenait, comme lors d'une explosion démographique. Le taux d'épuisement,

FIGURE N° 16



Graphique illustrant des situations dans lesquelles l'influence de systèmes antérieurs est affaiblie par la résonance morphique avec un seul système subséquent (A) et avec deux systèmes subséquents (B).

lent mais limité, d'influence morphique serait pratiquement indiscernable si chaque système influençait de nombreux systèmes subséquents.

Dans un souci de simplicité, nous présumerons que l'influence morphiques de systèmes sur des systèmes semblables antérieurs n'est *en aucune façon* affaiblie. Nous nous souviendrons toutefois que ce postulat est temporaire. Cette question pourrait faire l'objet d'une recherche empirique, au moins afin de distinguer entre un taux rapide d'épuisement de résonance morphique d'une part et un taux lent ou inexistant d'autre part.

5.6. Un test expérimental possible

La théorie traditionnelle affirme que les formes uniques des systèmes chimiques et biologiques sont prévisibles avant leur première apparition en termes de principes de mécanique quantique, d'électromagnétisme, de causalité formative, etc. L'hypothèse de la causalité formative argue en revanche que les formes uniques ne sont pas prévisibles, seul l'est un éventail de formes possibles. Ainsi l'échec de la théorie traditionnelle à fournir des prévisions uniques la desservirait et plaiderait en faveur de l'hypothèse de la causalité formative. Ceci vaut en principe, mais en pratique cet insuccès ne sera jamais probant : seuls des calculs approximatifs sont réalisables, et les défenseurs de cette théorie prétendront toujours que des prévisions uniques seront possibles si des calculs plus raffinés sont à l'avenir menés à bien.

L'hypothèse de la causalité formative diffère heureusement à un autre égard de la théorie traditionnelle. Selon cette dernière, les causes qui engendrent une forme pour la première fois ou pour la centième ou pour la millionième opèrent exactement de la même façon puisqu'elles sont réputées immuables. D'autres théories, qui cherchent à expliquer de manière empirique des formes observables en termes de Formes archétypes éternelles ou de vérités mathématiques transcendantes, fournissent la même explication. Mais l'hypothèse de la causalité formative prétend que la forme d'un système dépend de l'influence morphique cumulative de systèmes semblables antérieurs. Ainsi cette influence serait-elle plus forte à la millionième occasion plutôt qu'à la millième ou qu'à la dixième. Cette hypothèse se démarquerait tant de la théorie traditionnelle que des théories pla-

tonicienne ou pythagoricienne si cet aspect cumulatif de la causalité formative était démontré empiriquement.

Dans le cas d'unités morphiques existant depuis très longtemps — des milliers de millions d'années en ce qui concerne l'atome d'hydrogène — le champ morphogénétique sera si bien établi qu'il sera effectivement immuable. Les champs morphogénétiques des unités morphiques dont l'origine ne remonte qu'à quelques siècles ou à quelques décennies peuvent également être sujets à l'influence de tant de systèmes antérieurs que tout accroissement de leur influence sera trop faible pour être décelée. Rien n'interdit d'avancer que chez les formes tout à fait nouvelles certaines conditions expérimentales permettraient de discerner l'influence morphique cumulative.

Considérons un corps chimique organique récemment synthétisé et n'ayant jamais existé auparavant. Selon l'hypothèse de la causalité formative, sa forme cristalline est imprévisible et aucun champ morphogénétique n'existe encore pour cette forme. Mais après la première cristallisation, la forme de son cristal influencera des cristallisations subséquentes par la résonance morphique et plus il y aura de cristallisations plus l'influence deviendra puissante. La substance ne cristallisera donc pas aisément la première fois, mais ensuite la cristallisation se déroulera de plus en plus facilement puisque le nombre croissant de cristaux antérieurs participera à son champ morphogénétique par la résonance morphique.

Des chimistes, qui ont synthétisé entièrement de nouveaux corps chimiques, éprouvent souvent les plus grandes difficultés à obtenir la première cristallisation de ces substances. Elles cristallisent cependant de plus en plus facilement par la suite.

Le compte-rendu suivant, extrait d'un manuel sur les cristaux, traitant de l'apparition spontanée et inattendue d'un nouveau type de cristal illustre ce principe :

« Il y a une dizaine d'années, une société ouvrit une usine qui produisait de grands cristaux simples de tartrate de diamine éthylène à partir de solutions aqueuses. Les cristaux étaient ensuite expédiés vers une autre usine, distante de plusieurs kilomètres, où ils étaient taillés et polis à des fins industrielles. Un an après l'ouverture de l'usine, les cristaux dans les réservoirs de croissance commencèrent à mal se développer ; des cristaux de « quelque chose d'autre » y adhéraient : « quelque chose » qui se développait plus rapidement. L'affliction gagna vite la

seconde usine : les cristaux taillés et polis avaient contracté la même maladie...

« Le matériau désiré était de l'anhydride de tartrate de diamine éthylène, et le matériau obtenu était le monohydrate de cette substance. Durant trois ans de recherche et de développement et une année supplémentaire de fabrication, aucune graine de monohydrate ne se forma. Elles semblèrent ensuite proliférer ». (A. Holden et P. Singer.) (7)

Ces auteurs suggèrent que sur d'autres planètes, des types de cristaux communs sur terre pourraient n'être pas encore apparus, et ils ajoutent :

« Rien n'interdit de penser que dans notre propre monde, maintes autres espèces solides possibles sont encore inconnues, non parce que les composants font défaut, mais simplement parce que les graines appropriées n'ont pas encore été produites. » (8)

L'explication traditionnelle fournie au fait que des substances cristallisent en général plus facilement après la première cristallisation et au fait que plus elles ont cristallisé, plus la cristallisation sera facile, prétend que des fragments de cristaux précédents « infectent » les solutions suivantes. Alors qu'il n'existe aucun moyen évident qui permettrait à ces graines de se déplacer, d'aucuns avancent qu'elles voyagent à travers l'atmosphère à l'instar des particules microscopiques de poussière.

Il ne subsiste aucun doute quant au fait que l'« infection » d'une solution sursaturée de germes de cristaux appropriés favorise la cristallisation. Mais selon l'hypothèse de la causalité formative, la cristallisation d'une substance serait également facilitée du simple fait d'une cristallisation précédente. Nos connaissances nous permettent d'avancer que l'augmentation du nombre de nucléus dans l'atmosphère n'est pas la seule explication possible. Cette question pourrait faire l'objet d'une investigation expérimentale sous certaines conditions particulières : les particules de poussière seraient retirées en filtrant l'air et ainsi toutes les autres contaminations potentielles seraient éliminées. Le temps que requerrait une substance nouvellement synthétisée pour cristalliser à partir d'une solution sur-saturée pourrait être mesuré dans des conditions standardisées rigoureuses

en l'absence de germes à la fois avant et après que cette substance aurait cristallisé de manière répétitive en un autre lieu. Une diminution de ce laps de temps confirmerait le bien-fondé de l'hypothèse de la causalité formative.

Grâce à des expériences encore plus complexes, il serait possible de démontrer non seulement que le champ morphogénétique d'une espèce cristalline particulière était soumis à l'influence cumulative des cristaux antérieurs mais encore que la structure de ce champ n'était pas déterminée avant l'apparition du premier cristal de ce type. Considérons par exemple la procédure suivante.

Une solution d'un corps chimique récemment synthétisé est divisée en plusieurs échantillons, disons P, Q et R, et chacun d'eux est dirigé vers des laboratoires éloignés les uns des autres de plusieurs centaines de kilomètres ; cette mesure est prise à titre de précaution et vise à éviter la contamination. Chaque échantillon est ensuite délibérément ensemencé avec un type différent de cristal, ceci afin de favoriser différents modèles de cristallisation du nouveau corps chimique dont la forme du cristal est indéterminée *ex hypothesi*. Ces cristallisations se déroulent autant que faire se peut de manière simultanée. Présumons que P, Q et R donnent chacun un type de cristal différent. Des échantillons de ces cristaux sont analysés et leurs structures déterminées par une cristallographie aux rayons X. L'un d'eux est ensuite sélectionné au hasard, disons R, et d'importants échantillons du corps chimique sont soumis à des cristallisations répétitives en utilisant des germes de cristaux du type R. Selon l'hypothèse de la causalité formative, ce grand nombre de cristaux de type R aurait une influence morphique plus puissante sur toutes les cristallisations subséquentes que les petits échantillons initiaux de cristaux de types P et Q, et il existerait donc une probabilité supérieure d'obtenir des cristaux de type R plutôt que des cristaux de types P ou Q.

On tente ensuite de répéter les cristallisations de types P et Q avec les mêmes sortes de nucléus que celles utilisées initialement. On procède à cette opération en l'absence de tout autre germe. Le résultat supporterait l'hypothèse de la causalité formative si dans tous ces cas des cristaux de type R étaient obtenus. Ce type d'expérimentation fournirait des preuves convaincantes s'il pouvait être répété avec de nombreuses substances récemment synthétisées.

Le résultat ne serait toutefois pas probant si seul un type simple de cristal était obtenu initialement dans P, Q et R. D'un côté, si la cristallisation débutait légèrement plus tôt dans une de ces solutions,

l'influence de ces cristaux par résonance morphique pourrait être suffisamment forte pour provoquer le même type de cristallisation dans les autres solutions. D'un autre côté, ce résultat confirmerait également la supposition traditionnelle voulant qu'une forme de cristal simple soit obtenue du simple fait qu'il s'agirait d'une structure simple d'énergie minimum. Il devrait être possible néanmoins — y compris avec un type simple de cristal — de déceler une diminution du temps nécessaire à la substance pour cristalliser en des conditions standards puisqu'un nombre croissant de cristaux antérieurs du même type participent aux champs morphogénétiques par résonance morphique.

Les expérimentations sur les cristaux ne constituent qu'un des éventuels moyens de vérifier l'hypothèse de la causalité formative. Nous considérerons d'autres expériences possibles sur des systèmes biologiques dans les sections 7.4, 7.6, 11.2 et 11.4.

NOTES

(1) Mackie (1974).

(2) Hesse (1961).

(3) Maints exemples des oscillations au sein de systèmes biologiques ont été décrits. Cf. Rapp (1979) pour les oscillations au niveau cellulaire.

(4) La vibration d'un système induite par un stimulus énergétique unidimensionnel est susceptible d'engendrer des formes et des modèles précis : les « portraits Chladni » produits par le sable ou par d'autres petites particules sur un diaphragme vibratoire en constituent des exemples simples. Jenny (1967) donne des illustrations de maints modèles bi- et tridimensionnels des surfaces vibratoires. Mais ceci n'est pas comparable au type de morphogenèse dû à la résonance morphique.

(5) Cf. Hesse (1961) et Mackie (1974) pour la question de la possibilité des influences causales sur des événements futurs.

(6) La preuve de la préconnaissance ne vaudrait pour cet argument que si on supposait dans les sphères métaphysiques que les états mentaux constituent un aspect des états physiques du corps, ou leur sont parallèles ou encore représentent un épiphénomène. Cependant d'après le point de vue de l'interactionnisme, une influence venue d'états *mentaux* futurs n'exigerait pas de manière obligatoire qu'une influence *physique* ait un effet rétroactif. Ces différentes alternatives sont étudiées dans le chapitre 12.

(7) Holden et Singer (1961).

(8) Ibid.

CHAPITRE 6

CAUSALITÉ FORMATIVE ET MORPHOGENÈSE

6.1. Morphogenèses séquentielles

Après l'agrégation des particules élémentaires en atomes, ceux-ci s'organisent en molécules et les molécules en cristaux. Les formes des cristaux sont immuables tant que la température demeure en dessous de leur point de fusion. Les processus morphogénétiques des organismes vivants se poursuivent en revanche indéfiniment en des cycles répétés de croissance et de reproduction.

Les organismes vivants les plus simples sont monocellulaires, leur division suit leur croissance et leur croissance la division. Ainsi les germes morphogénétiques des chréodes concernant la division apparaissent-ils dans les formes finales des cellules tout à fait développées ; et les cellules nouvellement divisées servent de points de départ pour les chréodes de croissance et de développement cellulaires.

Dans les organismes multicellulaires, ces cycles ne se poursuivent que dans certaines cellules, par exemple dans les cellules de lignée germinale, dans les cellules de la tige et dans les cellules des méristèmes. Les autres cellules, et en fait la totalité des tissus et des organes, se développent selon diverses structures spécialisées qui subissent peu de changement morphogénétique : leur croissance cesse bien qu'elles conservent la faculté de se régénérer après des dommages, puis elles meurent tôt ou tard. En fait, la mortalité de ces cellules pourrait être due à l'arrêt de leur croissance. (1)

Le développement des organismes multicellulaires se déroule à tra-

vers une série de stades contrôlés par une succession de champs morphogénétiques. Les tissus embryonnaires se développent d'abord sous le contrôle de champs embryonnaires primaires. Puis tôt (dans le développement « mosaïque ») ou tard (dans le développement « régulateur »), différentes régions tombent sous l'influence de champs secondaires : chez les animaux, ceux des membres, des yeux, des oreilles, etc. ; chez les végétaux, les feuilles, les pétales, les étamines, etc. La morphogenèse provoquée par les champs primaires n'est en général pas spectaculaire, mais elle est d'une importance fondamentale puisqu'elle établit les différences caractéristiques entre des cellules dans différentes régions qui (selon la présente hypothèse) leur permettent d'agir en tant que germes morphogénétiques des champs des organes. Des germes de champs subsidiaires apparaissent ensuite dans les tissus subissant leur influence, champs qui contrôlent la morphogenèse des structures de l'organe en tant que tout : dans une feuille, les limbes, les stipules, les pétioles, etc. ; dans un œil, la cornée, l'iris, le cristallin, etc. Des champs morphogénétiques de niveau inférieur entrent alors en scène : ceux de la différenciation vasculaire dans les limbes d'une feuille et de la différenciation cellulaire du stomate et du duvet à sa surface.

Ces champs ont fait l'objet d'investigations expérimentales visant à étudier la capacité de régulation des organismes en développement après que différentes régions embryonnaires eurent été endommagées et après que des tissus prélevés en une région eurent été greffés en une autre. Chez les embryons des animaux comme dans les zones du méristème des végétaux, les différentes régions affichent une autonomie croissante au fur et à mesure du développement des tissus. Le système en tant que tout perd sa faculté de régulation, mais des régulations locales se produisent dans les organes en développement lorsque les champs embryonnaires primaires sont supplantés par des champs secondaires plus nombreux. (2)

6.2. La polarité des champs morphogénétiques

Nombre d'unités morphiques biologiques sont polarisées au moins dans une direction. Leurs champs morphogénétiques, renfermant des formes virtuelles polarisées, adopteront automatiquement des orientations appropriées si leurs germes morphogénétiques sont également polarisés de manière intrinsèque ; mais dans le cas contraire, une polarité devra d'abord leur être imposée. Par exemple, les cellu-

les embryonnaires sphériques de l'algue *Fucus* ne possèdent pas de polarité inhérente, et leur développement ne débute que lorsqu'elles ont été polarisées par un des multiples stimuli directionnels incluant la lumière, des gradients chimiques et des courants électriques ; à défaut de tels stimuli, une polarité est adoptée fortuitement, due sans aucun doute à des fluctuations hasardeuses.

La plupart des organismes multicellulaires sont polarisés dans une direction apex-racine ou tête-queue, maints autres le sont dans une seconde direction (ventrale-dorsale) et certains dans trois (tête-queue, ventrale-dorsale et gauche-droite). Ces derniers sont en conséquence asymétriques et potentiellement capables d'exister en des formes qui sont des reflets l'une de l'autre, par exemple les escargots et leurs coquilles en spirale. Et dans les organismes ayant une symétrie bilatérale, les structures asymétriques se manifestent nécessairement sous deux formes droite et gauche, telles que les mains.

Ces formes reflets présentent la même morphologie et il est probable qu'elles se développent sous l'influence du même champ morphogénétique. Le champ se charge simplement de la chiralité du germe morphogénétique avec lequel il est associé. Ainsi les systèmes précédents placés à gauche et à droite influencent-ils par résonance morphique les systèmes subséquents gauche et droite.

Quelques faits bien connus en biochimie étayent cette interprétation. Les molécules des acides aminés et des sucres sont asymétriques et sont capables d'exister sous une forme gauche ou droite. Tous les acides aminés des protéines des organismes vivants sont sous une forme gauche alors que la plupart des sucres sont sous une forme droite. La perpétuation de ces asymétries chimiques est rendue possible par les structures asymétriques des enzymes qui catalysent la synthèse des molécules. La plupart des acides aminés et des sucres ne sont que rarement — voire jamais — rencontrés dans la nature en dehors des organismes vivants. Rien n'interdit donc d'avancer que ces formes asymétriques particulières participent aux champs morphogénétiques des molécules via la résonance morphique. Mais lors de leur synthèse artificielle, on obtient des proportions égales de formes gauches et droites, ce qui indique que les champs morphogénétiques sont dépourvus de chiralité.

6.3. La taille des champs morphogénétiques

Les dimensions des unités morphiques atomiques et moléculaires

particulières sont plus ou moins constantes ; il en va de même des structures des cristaux bien qu'elles soient répétées indéfiniment pour donner des cristaux de tailles différentes. Les unités morphiques biologiques sont plus variables : il existe non seulement des différences entre les cellules, les organes et les organismes de types donnés, mais encore les unités morphiques individuelles elles-mêmes changent de taille lors de leur croissance. En admettant que la résonance morphique se déroule à partir de systèmes antérieurs ayant des formes semblables mais des tailles différentes, et qu'un champ morphogénétique demeure en association avec un système en développement, nous en concluons que les formes sont susceptibles d'être « développées » ou « réduites » homothétiquement dans le champ morphogénétique. Ainsi leurs traits essentiels doivent-ils dépendre non de la position absolue mais de la position relative de leurs parties composantes et de leur taux relatif de vibration. Un disque que l'on écoute à différentes vitesses nous fournit une analogie simple : la musique demeure reconnaissable en dépit des altérations absolues de tous les accents et de tous les rythmes, parce que les relations entre les notes et les rythmes demeurent les mêmes.

Bien que les champs morphogénétiques puissent s'adapter en taille absolue, l'étendue dans laquelle la taille d'un système peut varier est limitée par de rigoureuses contraintes physiques. Dans les systèmes tridimensionnels, des changements en superficie et en volume interviennent respectivement comme les puissances carrée et cubique des dimensions linéaires. Ce simple fait implique que des systèmes biologiques ne peuvent être agrandis ou diminués à l'infini sans devenir instables. (3)

6.4. La spécificité croissante de la résonance morphique au cours de la morphogenèse

La résonance énergétique n'est pas un processus de « tout ou rien » : un système résonne en réponse à un domaine de fréquences plus ou moins proche de sa fréquence naturelle, bien que la réponse optimum intervienne essentiellement lorsque la fréquence coïncide avec la sienne. D'une manière analogue, la résonance morphique peut être « accordée » avec une subtilité plus ou moins grande et elle se manifestera avec la plus grande spécificité quand les formes des systèmes antérieurs et présents seront très proches les unes des autres.

Quand un germe morphogénétique entre en résonance morphique

avec les formes des innombrables systèmes précédents de niveau supérieur, ces formes ne coïncident pas exactement entre elles mais engendrent une structure de probabilité. Au cours des premiers stades de la morphogenèse, des structures sont réalisées dans des régions données par la structure de probabilité. Le système présente alors une forme mieux définie et plus développée, il ressemble donc aux formes de certains systèmes semblables antérieurs plus étroitement qu'à d'autres et la résonance morphique de ces formes sera plus spécifique et donc plus effective. La sélectivité de la résonance morphique s'accroîtra encore au cours du développement.

Le développement d'un organisme à partir d'un œuf fertilisé nous offre une illustration générale de ce principe. Les premiers stades d'embryogenèse ressemblent souvent à ceux de nombreuses autres espèces ou familles voire ordres. Au cours du développement, les traits particuliers de l'ordre, de la famille, du genre et finalement de l'espèce tendent à apparaître de manière séquentielle, et les différences relativement mineures qui distinguent l'organisme individuel des autres individus de la même espèce apparaissent en général en dernier lieu.

Cette résonance morphique de plus en plus spécifique tendra à canaliser le développement vers des variantes particulières de la forme finale qui se sont manifestées dans des organismes antérieurs. Le cours du développement sera affecté tant par des facteurs génétiques qu'environnementaux : un organisme doté d'une constitution génétique particulière tendra à se développer de manière à entrer en résonance morphique avec des individus précédents ayant la même constitution génétique ; et les effets environnementaux sur le développement tendront à placer l'organisme sous l'influence morphique spécifique d'organismes précédents s'étant développés dans le même environnement.

Les unités morphiques semblables et antérieures qui étaient parties constitutantes du même organisme exerceront un effet plus spécifique. Ainsi dans le développement des feuilles d'un arbre, les formes des feuilles précédentes de cet arbre seront susceptibles de participer de manière plus significative au champ morphogénétique en tendant à stabiliser la forme de la feuille caractéristique de cet arbre particulier.

6.5. La préservation et la stabilité des formes

A la fin d'un processus de morphogenèse, la forme réelle d'un système coïncide avec la forme virtuelle donnée par le champ morphogénétique. Le phénomène de régénération met en évidence l'association continue du système et de son champ. Le rétablissement de la forme du système après des déviations infimes de la forme finale est moins évident, mais tout aussi important : le champ morphogénétique stabilise continuellement l'unité morphique. Dans les systèmes biologiques, et dans une certaine mesure dans les systèmes chimiques, cette préservation de la forme permet aux unités morphiques de persister quoique leurs parties constituantes subissent un « roulement » et soient remplacées. Le champ morphogénétique quant à lui perdure autorisant ainsi l'influence continue des formes de systèmes antérieurs semblables.

Un trait des plus intéressants de la résonance morphique agissant sur un système doté d'une forme persistante est que cette résonance inclura une participation des états passés du système lui-même. Cette auto-résonance sera très spécifique à ce stade puisqu'un système se ressemble plus à lui-même tel qu'il fut dans le passé qu'il ne ressemble à tout autre système antérieur. Rien n'interdit d'avancer qu'il s'agit peut être de l'importance la plus fondamentale dans la préservation de l'identité du système.

Nul ne songe plus que la matière est constituée de particules solides évoquant de minuscules boules de billard qui résistent à l'épreuve du temps. Les systèmes matériels sont des structures dynamiques qui se recréent constamment elles-mêmes. Selon la présente hypothèse, la persistance des formes matérielles dépend de la réalisation incessante du système sous l'influence de son champ morphogénétique ; la résonance morphique des systèmes semblables et antérieurs recrée de manière simultanée et continue le champ morphogénétique. Les formes qui sont les plus semblables et qui auront en conséquence les effets les plus puissants seront celles du système lui-même dans un passé immédiat. Cette conclusion comporte semble-t-il des implications physiques profondes : la résonance préférentielle d'un système avec lui-même dans le passé immédiat aiderait à expliquer (de manière concevable) sa persistance non seulement dans le temps, mais encore en un lieu particulier. (4)

6.6. Une remarque sur le « dualisme » physique

Rien n'interdit de considérer que toutes les unités morphiques réelles sont des *formes* d'énergie. D'un côté, leurs structures et leurs modèles d'activité dépendent des champs morphogénétiques auxquels elles sont associées et sous l'influence desquels elles doivent apparaître. D'un autre côté, leur existence et leur faculté d'interagir avec d'autres systèmes matériels sont dues à l'énergie qu'elles contiennent. Mais bien que d'un point de vue conceptuel, ces aspects de la forme et de l'énergie puissent être dissociés, en réalité ils sont toujours associés. Aucune unité morphique ne disposera d'énergie en l'absence de forme, et aucune forme matérielle n'existera en l'absence d'énergie.

Cette « dualité » physique de la forme et de l'énergie, que l'hypothèse de la causalité formative explicite, a beaucoup en commun avec la dite dualité onde-particule de la théorie quantique.

Selon l'hypothèse de la causalité formative, il n'existe qu'une différence de degré entre la morphogenèse des atomes et celles des molécules, des cristaux, des cellules, des tissus, des organes et des organismes. Si le « dualisme » est défini de telle façon que les orbites des électrons dans les atomes impliquent une dualité des ondes et des particules, ou de la forme et de l'énergie, les formes les plus complexes des unités morphiques de niveau supérieur le feront également. En revanche si on refuse de considérer que les premiers présentent un caractère dualiste, il en ira de même des seconds. (5)

Il est évident qu'il existe une différence entre l'hypothèse de la causalité formative et la théorie traditionnelle en dépit de leur similitude. La dernière ne fournit aucune compréhension fondamentale de la causalité des formes, à moins que les équations ou les « structures mathématiques » les décrivant soient supposées jouer un rôle causal ; nous devrions dans ce cas en déduire qu'il existe un mystérieux dualisme entre les mathématiques et la réalité. L'hypothèse de la causalité formative surmonte cette difficulté en considérant les formes de systèmes antérieurs en tant que causes des formes semblables ultérieures. D'un point de vue conventionnel, le remède pourrait être pire que le mal en ce sens qu'il requiert une action à travers l'espace et le temps contrairement à tout autre type connu d'action physique. Il ne s'agit pas cependant d'une proposition métaphysique mais d'une proposition physique, laquelle est vérifiable par l'expérience.

Si des preuves expérimentales confirmaient cette hypothèse, cela

permettrait l'interprétation des divers champs de matière de la théorie du champ quantique en termes de champs morphogénétiques, mais encore cela conduirait vers une nouvelle compréhension des autres champs physiques.

Dans le champ morphogénétique d'un atome, un noyau atomique dénudé entouré d'orbites virtuelles sert d'« attracteur » morphogénétique aux électrons. Il se pourrait que la dite attraction électrique entre les noyaux et les électrons puisse être considérée comme un aspect de ce champ morphogénétique atomique. Quand la capture des électrons a réalisé la forme finale de l'atome, celui-ci n'agit plus comme un « attracteur » morphogénétique, et selon la terminologie électrique, il est neutre. L'idée voulant que les champs électromagnétiques soient dérivés des champs morphogénétiques des atomes n'est donc pas inconcevable.

D'une manière comparable, il serait en fin de compte possible d'interpréter les forces nucléaires fortes et faibles en termes de champs morphogénétiques des noyaux atomiques et des particules nucléaires.

6.7. Un résumé de l'hypothèse de la causalité formative

1) En plus des types de causalité énergétique connus de la physique, et en plus de la causalité due aux structures des champs physiques connus, un autre type de causalité est responsable des formes de toutes les unités morphiques matérielles (particules atomiques, atomes, molécules, cristaux, agrégats quasi-cristallins, organites, cellules, tissus, organes et organismes). La forme, dans le sens où nous l'entendons, inclut non seulement la forme de la surface extérieure de l'unité morphique mais encore sa structure interne. Cette causalité, dite causalité formative, impose un ordre spatial aux modifications induites par la causalité énergétique. Elle n'est pas énergétique en elle-même, pas plus qu'elle n'est réductible à la causalité engendrée par des champs physiques connus (Sections 3.3, 3.4).

2) La causalité formative dépend des *champs morphogénétiques*, structures ayant des effets morphogénétiques sur des systèmes matériels. Chaque sorte d'unité morphique possède son propre champ morphogénétique caractéristique. Dans la morphogenèse d'une unité morphique particulière, une ou plusieurs de ces parties caractéristiques — qualifiées de *germes morphogénétiques* — s'entoure(nt) du, ou s'encastre(nt) dans le champ morphogénétique de l'unité morphi-

que entière. Ce champ renferme la forme virtuelle de l'unité morphique, qui est actualisée lorsque les parties composantes appropriées tombent sous le coup de son influence et adoptent leurs positions relatives appropriées. Cet ajustement positionnel des parties d'une unité morphique s'accompagne d'une libération d'énergie, en général de chaleur, et est spontanée sur un plan thermodynamique ; les structures des unités morphiques apparaissent comme des minima ou comme des « gouffres » d'énergie potentielle d'un point de vue énergétique (Sections 3.4, 4.1, 4.2, 4.4, 4.5).

3) La morphogenèse inorganique est rapide, mais la morphogenèse biologique est relativement lente et traverse une succession de stades intermédiaires. Un type donné de morphogenèse suit en général une voie de développement particulière ; cette voie canalisée est nommée *chréode*. La morphogenèse est néanmoins susceptible de se poursuivre vers la forme finale à partir de différents germes morphogénétiques et en empruntant différentes voies comme dans les phénomènes de régulation et de régénération. Dans les cycles de croissance et de division cellulaire et dans le développement des structures différenciées des organismes multicellulaires, une succession de processus morphogénétiques se déroule sous l'influence d'une succession de champs morphogénétiques (Sections 2.4, 4.1, 5.4, 6.1).

4) La forme caractéristique d'une unité morphique donnée est déterminée par les formes des systèmes semblables et antérieurs qui agissent sur elle à travers le temps et l'espace grâce à un processus nommé *résonance morphique*. Cette influence se déroule à travers le champ morphogénétique et dépend des structures tridimensionnelles et des modèles de vibration des systèmes. La résonance morphique est analogue à la résonance énergétique dans sa spécificité, mais aucun type connu de résonance ne permet de l'expliquer et elle n'implique pas non plus une transmission d'énergie (Sections 5.1, 5.3).

5) Tous les systèmes semblables antérieurs agissent sur un système semblable subséquent par résonance morphique. Nous présumons temporairement que cette action n'est pas atténuée par l'espace et par le temps et qu'elle se poursuit indéfiniment ; l'effet relatif d'un système donné décline toutefois lorsque le nombre de systèmes semblables contribuant à la résonance morphique augmente (Sections 5.4, 5.5).

6) L'hypothèse de la causalité formative explique la répétition des formes mais n'explique pas comment apparaît le premier exemple

d'une forme originale donnée. Cet événement unique est imputable au hasard ou à une créativité inhérente à la matière ou encore à une opération créative et transcendante. Choisir entre ces alternatives relève des domaines métaphysiques et n'entre pas dans le cadre de cette hypothèse (Section 5.1).

7) La résonance morphique à partir de stades intermédiaires de processus de morphogenèse semblables et précédents tend à canaliser des processus semblables subséquents dans les mêmes chréodes (Section 5.4).

8) La résonance morphique à partir de systèmes antérieurs dotés d'une polarité caractéristique n'intervient effectivement que lorsque le germe morphogénétique d'un système subséquent a été convenablement polarisé. Les systèmes qui sont asymétriques dans les trois dimensions et qui existent sous des formes droite ou gauche influencent des systèmes semblables subséquents par la résonance morphique indépendante de la chiralité (Section 6.2).

9) Les champs morphogénétiques sont adaptables en taille absolue et sont susceptibles d'être « augmentés » ou « réduits » homothétiquement dans certaines limites. Ainsi des systèmes précédents influencent-ils des systèmes ultérieurs de forme semblable par la résonance morphique en dépit du fait que leurs tailles absolues diffèrent (Section 6.3).

10) Même après l'adaptation de la taille, les nombreux systèmes précédents influençant un système subséquent par résonance morphique ne sont pas identiques mais seulement semblables en ce qui concerne la forme. Leurs formes ne se superposent donc pas avec précision dans le champ morphogénétique. Le type le plus fréquent de formes antérieures apporte la contribution la plus grande par résonance morphique, et le moins fréquent, la moindre : les champs morphogénétiques ne sont pas définis avec précision, mais sont représentés par des *structures de probabilité*, qui dépendent de la distribution statistique des formes semblables précédentes. Les distributions probabilistes des orbites électroniques décrites par les solutions de l'équation de Schrödinger constituent des exemples de ces structures de probabilité et sont semblables aux structures de probabilité des champs morphogénétiques des unités morphiques à des niveaux supérieurs (Sections 4.3, 5.4).

11) Les champs morphogénétiques des unités morphiques influencent la morphogenèse en agissant sur les champs morphogénétiques de leurs parties constituantes. Ainsi les champs des tissus

influencent-ils ceux des cellules ; ceux des cellules les organites ; ceux des cristaux, les molécules ; ceux des molécules, les atomes, etc. Ces actions dépendent de l'influence des structures de probabilité de niveau supérieur sur des structures de probabilité de niveau inférieur et sont donc probabilistes de manière inhérente (Sections 4.3, 4.4).

12) Dès que la forme finale d'une unité morphique est réalisée, l'action continue de la résonance morphique à partir de formes antérieures semblables la stabilise et la préserve. Si la forme persiste, la résonance morphique agissant sur elle inclura la participation de ses propres états antérieurs. A ce stade, le système ressemble plus à ses propres états passés qu'à ceux de tout autre système ; cette résonance sera très spécifique et il est possible qu'elle joue un rôle essentiel dans la préservation de l'identité du système (Sections 6.4, 6.5).

13) Vérifier expérimentalement l'hypothèse de la causalité formative est chose possible (5.6).

NOTES

(1) Il est probable qu'une importante cause du vieillissement, au moins au niveau cellulaire, soit l'accumulation de déchets nocifs que les cellules sont incapables d'éliminer. Selon une théorie récente, si les cellules grandissaient suffisamment vite, elle conserverait un « pas d'avance » sur cette accumulation simplement parce que la croissance dissout ces substances. En outre, dans les divisions cellulaires asymétriques, qui sont courantes chez les animaux et chez les végétaux supérieurs, ces substances peuvent être transmises inégalement aux cellules filles : l'une se régénérera aux dépens de la mortalité croissante de l'autre. Cette régénération dépend de la croissance et de la division cellulaire ; les points terminaux morphogénétiques — les cellules différenciées, les tissus et les organes des organismes multicellulaires — sont nécessairement mortels (Sheldrake, 1974).

(2) Voir Weiss (1939) pour des exemples concernant les animaux et Wardlaw (1965) pour les végétaux.

(3) Cf. Thompson (1942) pour la discussion classique de ce point élémentaire mais important.

(4) Si le système « s'identifie » lui-même à un emplacement particulier et si sa persistance à cet emplacement dépend de la résonance morphique avec lui-même dans le passé immédiat, sa résistance à être déplacé de cet emplacement — sa masse d'inertie — devrait être liée à la fréquence à laquelle cette auto-résonance se produit. La résonance dépendant des cycles caractéristiques de vibration, elle ne peut intervenir sur l'instant parce qu'un cycle de vibration demande du temps. Plus la fréquence de vibration sera élevée, plus récents seront les états antérieurs avec lesquels l'auto-résonance se produit ; la tendance du système à être « rivé » à son emplacement dans le passé immédiat sera donc plus grande. Inversement, plus la fréquence de vibration sera basse, moins forte sera la tendance d'un système à « s'identifier » avec lui-même à un emplacement particulier : il sera capable de se déplacer plus par rapport

aux autres objets avant de s'en « apercevoir ». Il existe une ressemblance remarquable entre la relation suggérée ci-dessus et la proportionnalité entre la masse d'une particule et la fréquence de son onde matière donnée par l'équation de De Broglie :

$$m = \frac{h\nu}{c^2}$$

dans laquelle m est la masse de la particule, ν la fréquence de vibration, h la constante de Planck et c la vitesse de la lumière. Cette relation est fondamentale pour la mécanique quantique et des preuves expérimentales la confirment.

(5) Sir Karl Popper, entre autres, a affirmé que parler d'un dualisme de la particule et de l'onde avait engendré une grande confusion, et il a suggéré que le terme dualisme soit abandonné :

« Je propose que nous parlions (à l'instar d'Einstein) de la particule et des champs de propension qui lui *sont associés* (le pluriel indique que les champs dépendent non seulement de la particule mais encore d'autres conditions), évitant ainsi la suggestion d'une relation symétrique. Sans l'établissement d'une telle terminologie comme celle-ci (« association » en lieu et place de « dualisme »), le terme survivra avec toutes les conceptions erronées qui lui sont liées ; car cela indique quelque chose d'important : l'association existant entre les particules et les champs de *propension* » (Popper, 1967).

Cette proposition s'harmoniserait avec l'hypothèse de la causalité formative si on considérait que les champs de propension incluaient les champs morphogénétiques.

CHAPITRE 7

L'HÉRITAGE DES FORMES

7.1. Génétique et hérédité

Les différences héréditaires entre des organismes par ailleurs semblables dépendent de différences génétiques ; les différences génétiques dépendent de différences dans la structure de l'ADN ou de son arrangement au sein des chromosomes ; et toutes ces différences conduisent à des modifications dans la structure des protéines ou à des changements dans le contrôle de la synthèse des protéines.

Ces découvertes fondamentales, que maintes preuves étayent, offrent une compréhension directe de l'héritage des protéines et de caractéristiques qui dépendent plus ou moins directement de protéines particulières, par exemple l'anémie à hématies falciformes et les désordres héréditaires du métabolisme. En revanche, les différences héréditaires de forme ne présentent en général aucune relation directe et évidente avec les modifications dans la structure ou la synthèse de protéines particulières. De tels changements affectent parfois la morphogenèse de diverses façons à travers les effets sur les enzymes métaboliques, sur les enzymes synthétisant les hormones, sur les protéines structurales, sur les protéines des membranes cellulaires, etc. Maints exemples de ces effets sont déjà connus. Etant donné que diverses modifications chimiques conduisent à des altérations ou à des distorsions du modèle normal de la morphogenèse, qu'est-ce qui détermine le modèle normal de la morphogenèse elle-même ?

La théorie mécaniste affirme que les cellules, les tissus, les organes et les organismes adoptent leurs formes appropriées parce que ces

dernières résultent de la synthèse des bons agents chimiques, aux bons endroits et aux bons moments. On suppose que la morphogenèse intervient de manière spontanée en tant que résultat d'interactions physico-chimiques complexes en accord avec les lois de la physique. Mais quelles lois ? La théorie mécaniste ne répond pas à cette question (Section 2.2).

L'hypothèse de la causalité formative suggère une nouvelle manière de répondre à cette question. Dans la mesure où elle offre une interprétation de la morphogenèse biologique soulignant l'analogie avec des processus physiques tels que la cristallisation, et où elle attribue un rôle important aux fluctuations indéterminées sur le plan énergétique, elle confirme plus qu'elle n'infirme les attentes de la théorie mécaniste. Mais alors que cette dernière impute la plupart des phénomènes héréditaires à l'héritage génétique rassemblé dans l'ADN, l'hypothèse de la causalité formative présume que les organismes héritent également les champs morphogénétiques d'organismes antérieurs appartenant à la même espèce. Ce second type d'héritage intervient via la résonance morphique et non via les gènes. L'hérédité inclut donc *tant* l'héritage génétique *que* la résonance morphique des formes antérieures semblables.

Considérons l'analogie suivante. La musique diffusée par le haut-parleur d'un poste de radio dépend *à la fois* des structures matérielles de l'appareil, de l'énergie qui l'alimente et de l'émission qu'il reçoit. Des changements dans les fils, dans les transistors, dans les condensateurs, etc., affecteront la musique et celle-ci cessera lorsqu'on enlèvera la pile. Un individu ignorant tout de la transmission des vibrations invisibles, intagibles et inaudibles par les champs électromagnétiques concevrait une explication se fondant sur les composants de l'appareil, sur son mode de construction et sur l'énergie dont son fonctionnement dépend. S'il envisageait la possibilité que quelque chose entre de l'extérieur, il l'abandonnerait en découvrant que le poids de l'appareil est constant, qu'il soit branché ou non. Il serait donc contraint de supposer que les modèles rythmique et harmonique de la musique s'élèvent dans le poste en tant que résultats d'interactions d'une grande complexité dans ses parties. Une étude et une analyse minutieuses de l'appareil lui permettraient d'en construire une réplique produisant les mêmes sons que l'original et il considérerait ce résultat comme une preuve étonnante de sa théorie. Cependant il ignorera toujours que la musique est émise dans un studio situé à plusieurs centaines de kilomètres.

Selon les termes de la causalité formative, l'« émission » viendrait de systèmes semblables antérieurs et sa « réception » dépendrait de la structure détaillée et de l'organisation du système récepteur. Comme dans un poste de radio, deux types de changement dans l'organisation du « récepteur » présenteront des effets significatifs. En premier lieu, des changements dans l'« accord du circuit » conduiraient à la réception d'« émissions » tout à fait différentes : un système en développement peut être « accordé » à différents champs morphogénétiques à l'instar d'un appareil de radio qui est susceptible de capter différentes stations. En second lieu, des changements dans un système se développant sous l'influence d'un champ morphogénétique spécifique conduisent parfois à diverses modifications et à diverses distorsions de la forme finale, exactement comme un poste de radio modifié, réglé sur une station particulière, entraînera des altérations et des distorsions de la musique s'échappant du haut-parleur. Ainsi des facteurs tant environnementaux que génétiques sont-ils susceptibles d'affecter la morphogenèse des organismes en voie de développement de deux manières : soit en modifiant l'accord des germes morphogénétiques, soit en changeant les voies habituelles de la morphogenèse afin d'engendrer des variantes des formes finales normales.

7.2. Les germes morphogénétiques modifiés

Les germes morphogénétiques pour le développement des organes et des tissus consistent en des cellules ou en des groupes de cellules possédant des structures et des modèles d'oscillation caractéristiques (Sections 4.5 et 6.1). Dans le cas où des conditions environnementales inhabituelles ou des altérations génétiques modifieraient suffisamment la structure et le modèle oscillatoire d'un germe, celui-ci ne s'associerait plus au champ morphogénétique habituel de niveau supérieur : soit il échouera à agir en tant que germe, auquel cas une structure entière fera défaut à l'organisme ; soit il s'associera à un champ morphogénétique différent, auquel cas une structure absente en temps normal dans cette partie de l'organisme se développera en lieu et place de la structure habituelle.

Maints exemples d'une telle perte d'une structure entière ou d'une telle substitution d'une structure à une autre ont été décrits. Des facteurs génétiques et des changements dans l'environnement de l'organisme en développement engendrent quelquefois les mêmes modifi-

cations ; la littérature y afférant qualifie ces phénomènes de « phénocopies ».

De tels effets ont fait l'objet d'une étude détaillée chez la mouche du vinaigre *Drosophila*. D'innombrables mutations identifiées entraînent des transformations de régions entières de l'insecte ; ainsi l'« antennapedia » transforme les antennes en pattes, et des mutations dans le complexe génique du « bithorax » font que le segment du métathorax, qui porte en temps normal deux balanciers, se développe comme un segment du mésothorax (Fig. 17). Les organismes

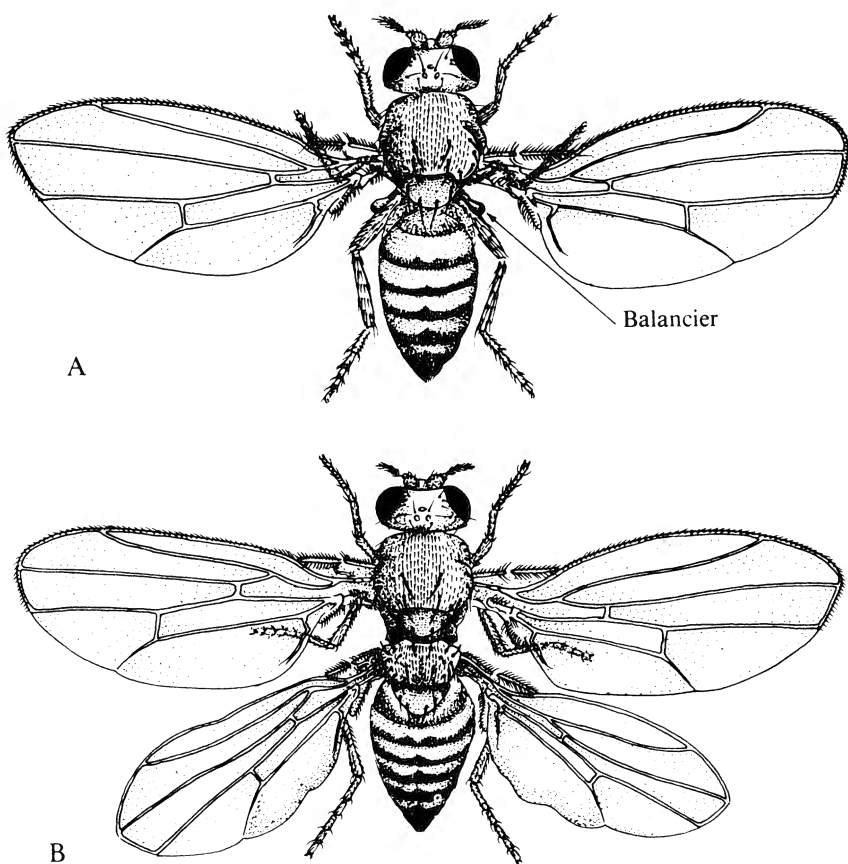


FIGURE N° 17. Un spécimen normal de la mouche du vinaigre *Drosophila* (A) et une mouche mutante (B) chez laquelle le troisième segment thoracique a été transformé de telle manière qu'il ressemble au deuxième. La mouche présente donc deux paires d'ailes au lieu d'une.

en résultant présentent donc deux paires d'ailes sur des segments adjacents. (1)

Des phénomènes comparables ont été découverts chez les végétaux. Chez le pois par exemple, les feuilles portent normalement des petites folioles à leur base et des vrilles à leur sommet. Chez certaines feuilles, des vrilles sont opposées à des folioles, indiquant que des primordia semblables sont susceptibles de donner naissance à deux types de structures (Fig. 18) ; rien n'interdit de présumer que les cel-

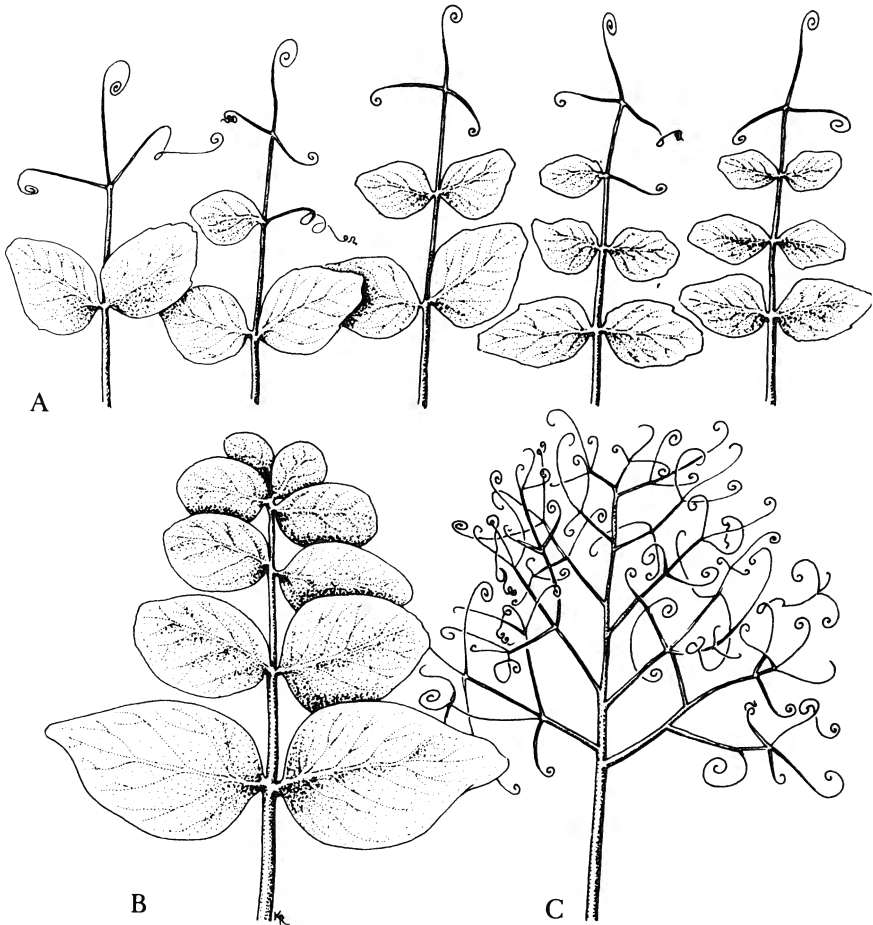


FIGURE N° 18.

- A. Feuilles de pois normales portant des folioles et des vrilles.
- B. Feuille d'un végétal mutant sur laquelle seuls des folioles se développent.
- C. Feuille d'un végétal mutant sur laquelle seules des vrilles se forment.

lules de ces primordia soient influencées par des facteurs intervenant au niveau de la feuille embryonnaire les contraignant à adopter la structure et le modèle oscillatoire caractéristiques du germe morphogénétique soit d'une vrille soit d'une foliole. Précisons cependant que dans un type de mutants, la faculté de former des vrilles est supprimée et que tous les primordia donnent naissance à des folioles ; chez un autre type de mutants (dû à un gène sur un chromosome différent), la formation de folioles est supprimée et tous les primordia engendrent des vrilles (2) (Fig. 18).

L'interprétation traditionnelle veut que les gènes responsables de ces effets soient impliqués dans le contrôle de la synthèse des protéines nécessaire aux processus normaux de morphogenèse. Une interprétation se fondant sur l'hypothèse de la causalité formative ne contredirait pas ce postulat mais le compléterait. Le produit du gène concerné ne serait pas considéré uniquement comme quelque chose qui « branche » ou qui « débranche » une série compliquée d'interactions chimiques mais comme quelque chose qui influence la structure d'un gène morphogénétique. Ceci peut être réalisé de diverses façons, par exemple par le codage d'une protéine qui modifie les propriétés des membranes cellulaires. Si la mutation affecte la structure de cette protéine et provoque des modifications dans les propriétés des membranes, les structures et les modèles oscillatoires des cellules du germe morphogénétique seraient susceptibles d'être altérées de telle façon qu'elles ne s'associent plus au champ morphogénétique habituel. Toute une voie de morphogenèse sera en conséquence bloquée. Les cellules impliquées dans cette voie n'expérimentant plus leur développement et leur différenciation normaux, elles ne synthétiseront plus les protéines caractéristiques de ces processus. Et dans le cas où le germe morphogénétique serait modifié afin qu'il s'associe à un champ morphogénétique différent par résonance morphique, les cellules en développement synthétiseraient alors les protéines appropriées à ce processus morphogénétique particulier.

Une mutation provoquant le blocage d'une voie de morphogenèse ou conduisant à la substitution d'une voie à une autre modifierait donc le produit d'un gène, lequel contrôle indirectement la synthèse type des protéines ainsi que le suppose la théorie mécaniste. Ce contrôle ne dépendrait toutefois pas seulement d'interactions chimiques compliquées mais encore il recourerait aux champs morphogénétiques en tant que médiateurs.

7.3. Les voies modifiées de la morphogenèse

Alors que les facteurs affectant des germes morphogénétiques ont des effets *qualitatifs* sur la morphogenèse aboutissant à l'absence d'une structure ou à la substitution d'une structure à une autre, maints facteurs environnementaux et génétiques provoquent des modifications quantitatives des formes finales des structures à travers leurs effets sur les processus de morphogenèse. Ainsi chez les végétaux d'une variété cultivée donnée croissant sous un éventail de conditions environnementales, la forme générale des systèmes végétatifs et radiculaires, la morphologie des feuilles et même l'anatomie de divers organes diffèrent-elles, mais la forme de la variété caractéristique demeure quant à elle reconnaissable. Chez des variétés différentes de la même espèce croissant dans le même environnement, les plantes diffèrent les unes des autres par de nombreux détails, alors qu'elles sont toutes des variantes reconnaissables d'une forme spécifique caractéristique : les espèces ne sont-elles pas définies en premier lieu en fonction de leur morphologie ?

Les facteurs génétiques et environnementaux influencent le développement à travers divers effets quantitatifs sur leurs composants structuraux, leur activité enzymatique, leurs hormones, etc. (Section 7.1). Certaines de ces influences sont relativement non-spécifiques et affectent différentes voies de morphogenèse. D'autres perturbent parfois le cours normal du développement mais n'ont que peu d'effets sur la forme finale, ceci étant dû à la régulation.

Tandis que certains effets génétiques surprenants sont imputables à des gènes spécifiques, la plupart dépendent de l'influence combinée de nombreux gènes, dont les effets individuels sont mineurs et difficiles à identifier et à analyser.

Selon l'hypothèse de la causalité formative, des organismes de la même variété ou de la même race se ressemblent non seulement parce qu'ils sont semblables sur le plan génétique et donc sujets à des influences génétiques semblables durant la morphogenèse, mais encore parce que leurs chréodes caractéristiques de variété sont renforcées et stabilisées par la résonance morphique des organismes antérieurs de la même variété.

Les champs morphogénétiques d'une espèce ne sont pas fixes, ils se modifient en fonction de son évolution. La plus grande contribution statistique aux structures de probabilité des champs morphogénétiques sera le fait des types morphologiques les plus communs, qui

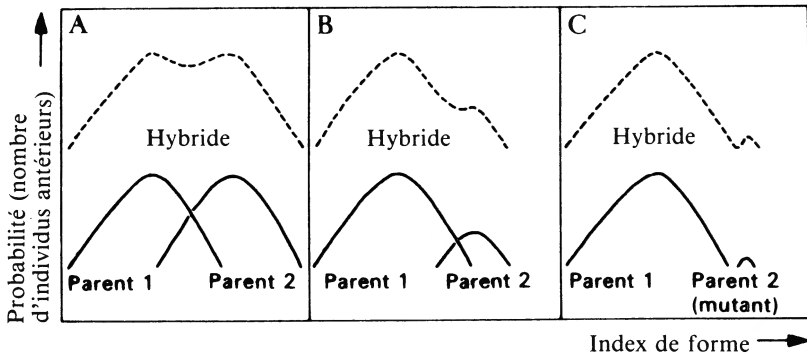
seront également ceux qui se sont développés dans les conditions environnementales les plus courantes. Dans les cas les plus simples, l'ajustement automatique à la moyenne de la résonance morphique stabilisera les champs morphogénétiques autour de la forme unique la plus probable ou « type sauvage ». Mais si l'espèce habite deux —ou plusieurs — environnements distincts sur les plans géographique et écologique dans lesquels est intervenue l'évolution de races ou de variétés caractéristiques, les champs morphogénétiques des espèces ne renfermeront pas une forme unique la plus probable, mais une distribution « multi-modale » de formes, dépendant du nombre de variétés ou de races distinctes sur le plan morphologique et des tailles relatives de leurs populations antérieures.

7.4. La dominance

Il semble à première vue que l'idée voulant que les formes de variété soient stabilisées par la résonance morphique des organismes antérieurs de la même variété n'ajoute pas grand-chose à l'explication traditionnelle en termes de similarité génétique. Son importance apparaît cependant lorsqu'on considère des organismes hybrides qui subissent la résonance morphique de deux types parentaux distincts. Reprenons l'analogie de l'appareil de radio : un poste ne capte qu'une station à la fois en des circonstances normales à l'instar d'un organisme qui est normalement « accordé » aux organismes antérieurs semblables de la même variété. Mais si la radio capte simultanément deux stations, le son qui en résultera dépendra de la puissance relative de leurs signaux : si l'un est très puissant et l'autre très faible, le dernier n'aura que peu d'effet ; mais s'ils sont de force égale, l'appareil diffusera un mélange de sons provenant de deux sources. De la même manière, chez un hybride résultant du croisement de deux variétés, la présence de gènes et de produits génétiques caractéristiques des deux tendra à mettre l'organisme en développement en résonance morphique avec les organismes passés des deux types parentaux. Les structures de probabilité entières dans les champs morphogénétiques de l'hybride dépendront alors de la force relative de la résonance morphique des deux types parentaux. Dans le cas où les deux parents sont issus de variété dont les populations antérieures sont comparables, ils tendront à influencer dans la même mesure la morphogenèse, donnant une combinaison ou une « résultante » des deux formes parentales (Fig. 19 A). Mais dans le cas où la

population de l'une des variétés serait moins importante que celle de l'autre, sa contribution moindre à la structure de probabilité entière signifiera que la forme de l'autre variété parentale tendra à dominer (Fig. 19 B). Et si l'un des parents est issu d'une lignée mutante d'origine récente, la résonance morphique émanant du petit nombre d'individus antérieurs de ce type apportera une contribution insignifiante à la structure de probabilité des hybrides (Fig. 19 C).

FIGURE N° 19 :



Représentation graphique des structures de probabilité des champs morphogénétiques des parents et des hybrides.

Les faits confirment ces prévisions. Premièrement, des hybrides de variétés ou d'espèces bien établies associent en général leurs traits ou sont de forme intermédiaire. Deuxièmement, chez les hybrides résultant d'une variété relativement récente et d'une variété ancienne, les caractéristiques de la dernière sont en principe plus ou moins dominantes. Et troisièmement, les mutations récentes affectant des caractères morphologiques sont presque toujours récessives.

Nul n'ignore que les théories mécanistes de la dominance sont à la fois vagues et spéculatives, sauf dans le cas de caractéristiques dépendant plus ou moins directement de protéines particulières. Si un gène mutant conduit à la disparition d'une fonction, par exemple en engendrant un enzyme défectueux, il sera récessif parce que chez les hybrides la présence d'un gène normal permet la production d'un enzyme normal et l'intervention des réactions biochimiques normales. Le produit génétique défectueux sera cependant dans certains cas nuisible, par exemple en interférant avec la perméabilité des membranes, auquel cas la mutation tendra à être à la fois dominante et létale.

Ces explications sont satisfaisantes. Toutefois, en l'absence d'une compréhension mécaniste de la morphogenèse, la tentative de justifier la dominance dans l'héritage de la forme par extrapolation du niveau moléculaire tient inévitablement pour vrai ce qui est en question.

Les théories génétiques conventionnelles de la dominance sont plus sophistiquées que la théorie purement biochimique ; elles insistent sur le fait que la dominance n'est pas fixe mais qu'elle évolue. Elles affirment que la dominance du « type sauvage » a été favorisée par la sélection naturelle afin d'expliquer l'uniformité relative des populations sauvages, dans lesquelles la plupart des mutations non léthales sont récessives. Une théorie postule la sélection des gènes modifiant la dominance d'autres gènes (3), et une autre la sélection de versions toujours plus efficaces des gènes qui contrôlent les caractères dominants en question. (4) En dehors du fait qu'il existe peu d'éléments en leur faveur, et certains en leur défaveur, celles-ci pèchent parce qu'elles présupposent plutôt qu'elles n'expliquent la dominance : elles ne proposent que des mécanismes hypothétiques susceptibles de la maintenir ou de l'accroître. (5)

Selon l'hypothèse de la causalité formative, la dominance évoluerait pour une tout autre raison. Des types favorisés par la sélection naturelle seraient représentés par un plus grand nombre d'individus que ceux ayant une espérance de vie inférieure ; les premiers acquerraient donc au fil du temps une dominance supérieure à travers l'effet cumulatif de résonance morphique.

L'expérimentation permettrait en principe de distinguer entre cette hypothèse et toutes les théories mécanistes de la dominance. Selon ces dernières, dans un ensemble donné de conditions environnementales, la dominance dépend uniquement de la constitution génétique d'un hybride alors que selon la première, elle dépend *tant* de la constitution génétique *que* de la résonance morphique des types parentaux. En conséquence, si la force relative de la résonance morphique des types parentaux évolue, la dominance de l'un par rapport à l'autre changera, même si la constitution génétique de l'hybride demeure la même.

Considérons l'expérience suivante. Des semences hybrides sont obtenues à partir d'un croisement entre des végétaux d'une variété bien définie (P1) et d'une lignée mutante (P2). Certaines de ces semences hybrides sont placées dans une chambre froide tandis que d'autres croissent en des conditions contrôlées. Les caractéristiques

des végétaux hybrides sont soigneusement observées et les végétaux eux-mêmes préservés. Chez ces végétaux, la morphologie P1 est tout à fait dominante (Fig. 19 C). Lorsqu'un très grand nombre de végétaux de type mutant (P2) se développent dans le champ, des hybrides sont remis en culture dans les mêmes conditions qu'auparavant et à partir du même échantillon de semences. P2 apportant à présent une contribution plus importante à la résonance morphique, P1 ne sera parfois que partiellement dominant (Fig. 19 B). La forme des hybrides sera susceptible d'être un intermédiaire des deux types parentaux (Fig. 19 A) lorsqu'un grand nombre de végétaux de type P2 auront poussé. Ces derniers se développeront de plus en plus, conséquemment aux hybrides à nouveau dans les mêmes conditions que les hybrides précédents du même échantillon de semences. Le type P2 apportera donc une contribution plus grande que P1 à la résonance morphique, et la morphologie P2 sera dominante.

Ce résultat confirme l'hypothèse de la résonance morphique, et serait tout à fait incompréhensible du point de vue de la théorie génétique orthodoxe. Le seul inconvénient de cette expérience est qu'elle serait difficile à mettre en pratique, puisque si P1 est une variété bien établie existant depuis très longtemps — dans le cas d'une variété sauvage depuis plusieurs milliers voir plusieurs millions d'années — il serait impossible de faire croître autant d'individus de type P2. Cette expérimentation ne serait réalisable que si P1 était une variété récente au sein de laquelle seul un nombre relativement petit d'individus antérieurs s'étaient développés.

7.5. Les ressemblances familiales

Au sein d'une variété donnée, les organismes diffèrent les uns des autres de manières multiples et mineures. Dans une population continuellement brassée, chaque individu est plus ou moins unique sur le plan génétique, et tend donc à suivre sa propre voie caractéristique de développement sous les influences quantitatives diverses de ses gènes. En outre, l'ensemble du processus est quelque peu indéterminé puisque la morphogenèse dépend de l'effet des structures de probabilité sur des événements probabilistes. L'environnement local varie donc. Il résulte de tous ces facteurs que chaque individu possède une forme caractéristique et apporte sa contribution personnelle aux champs morphogénétiques subséquents.

La résonance morphique la plus spécifique agissant sur un orga-

nisme particulier est susceptible d'être celle d'individus antérieurs très proches, dotés d'une constitution génétique semblable justifiant les ressemblances familiales. Cette résonance morphique spécifique sera superposée à la résonance spécifique moindre de nombreux individus antérieurs de la même variété, laquelle sera superposée à un contexte général de résonance morphique de tous les membres précédents de l'espèce.

Dans l'exemple de la vallée d'une chréode (cf. Fig. 5), la résonance morphique la plus spécifique déterminait le cours détaillé de la morphogenèse correspondant au lit d'un courant et la résonance morphique la moins spécifique d'individus précédents de la même variété au fond d'une petite vallée. Les chréodes variantes de différentes variétés au sein de la même espèce correspondraient aux petites vallées divergentes ou parallèles d'une vaste vallée représentant la chréode de l'espèce en tant que tout.

7.6. Les effets environnementaux et la résonance morphique

Les formes des organismes sont influencées à des degrés divers par les conditions environnementales dans lesquelles ils se développent. Selon l'hypothèse de la causalité formative, elles sont également influencées par les conditions environnementales dans lesquelles des organismes antérieurs et semblables se sont développés, parce que les formes de ces organismes participent à leurs champs morphogénétiques par résonance morphique. En reprenant l'analogie de l'appareil de radio, nous dirions que la musique s'échappant du haut-parleur est non seulement affectée par des changements à l'intérieur du récepteur, mais encore par des changements dans le studio : si un orchestre joue un morceau de musique différent, le poste récepteur diffusera des sons différents en dépit du fait que son réglage et que ses structures internes demeurent les mêmes.

Considérons par exemple une nouvelle variété d'une espèce cultivée. Si de nombreuses plantes de cette variété se sont développées dans un environnement et très peu dans d'autres, les premières apporteront une contribution plus grande aux structures de probabilité des champs morphogénétiques de la variété ; leur forme sera la forme la plus probable de la variété et elle tendra donc à influencer la morphogenèse de toutes les plantes subséquentes de la même variété, y compris si elles poussent en des environnements différents.

Afin de vérifier cette prévision, il serait préférable d'utiliser une récolte d'une variété auto-fécondée ; les végétaux seraient très semblables sur un plan génétique, et il n'y aurait aucun risque de croisement avec d'autres variétés. Pour commencer, quelques plantes seraient cultivées dans deux environnements très différents, X et Y, et leurs caractéristiques morphologiques soigneusement consignées. Certains des échantillons de semences originales seraient placés dans une chambre froide. On cultiverait dans l'environnement Y (soit en une saison soit en plusieurs générations) un nombre considérable de plantes. Ensuite, en utilisant quelques graines originales ayant été placées dans la chambre froide, quelques plantes seraient alors cultivées dans l'environnement X. Leur morphogenèse devrait alors être influencée par la résonance morphique du grand nombre de plantes semblables sur le plan génétique qui se sont développées dans l'espace Y. Elles devraient donc présenter une plus grande ressemblance avec la morphologie du type Y qu'avec les plantes du type X original. (Pour une comparaison valable des plantes cultivées en X à différentes occasions, il serait nécessaire de s'assurer de conditions pratiquement identiques ; ceci serait impossible dans le champ, mais serait réalisable sans trop de difficultés dans un environnement contrôlé artificiellement, dans un phytotron).

L'obtention de ce résultat fournirait une preuve à l'hypothèse de la causalité formative et serait inexplicable selon les termes de la théorie mécaniste.

Un résultat négatif ne prouverait rien pour deux raisons : premièrement, les effets directs de l'environnement X sur les processus morphogénétiques pourraient être si forts qu'ils canaliserait toujours des morphogenèses dans des chréodes de type X en dépit de l'effet mineur relativement stabilisant de la résonance morphique sur ces voies. Et deuxièmement, des végétaux d'autres variétés de la même espèce influenceraient le développement par résonance morphique bien que de manière moins spécifique ; néanmoins cette influence tendra parfois à stabiliser soit la chréode de type X soit celle de type Y, voire les deux, en particulier si ces environnements ressemblent à ceux dans lesquels des variétés antérieures de l'espèce croissaient en temps normal. Un choix judicieux des environnements minimiserait cet effet.

7.7. L'héritage des caractéristiques acquises

L'influence d'organismes antérieurs sur des organismes semblables subséquents par résonance morphique engendrerait des effets inconcevables si l'hérédité dépendait uniquement du transfert des gènes et d'autres structures matérielles des parents à leur progéniture. Cette possibilité permet d'envisager la question de l'« héritage des caractéristiques acquises » sous un jour nouveau.

Dans la vive controverse de la fin du dix-neuvième siècle et du tout début du vingtième siècle, les Lamarckiens comme les partisans de Weismann et de Mendel affirmaient que l'hérédité dépendait uniquement du plasma germinatif en général ou des gènes en particulier. Afin que les caractéristiques acquises par des organismes en réponse à l'environnement soient sujettes à l'héritabilité, le plasma germinatif ou les gènes devraient subir des modifications spécifiques. Les adversaires des Lamarckiens prétendaient que de telles modifications semblaient extrêmement improbables, voire impossibles. Les Lamarckiens eux-mêmes étaient incapables de suggérer un mécanisme plausible par lequel ces changements interviendraient.

D'un autre côté, la théorie lamarckienne semblait fournir une explication plausible aux adaptations héréditaires chez les animaux et chez les végétaux. Par exemple, les chameaux ont des callosités sur les genoux. Il est simple de comprendre que celles-ci sont apparues en réponse à l'abrasion de leur peau lorsqu'ils s'agenouillent. Mais à la naissance, leurs petits présentent les mêmes callosités. De tels faits prendraient une signification si les caractéristiques acquises d'une façon ou d'une autre devenaient héréditaires.

Les Mendéliens nient cependant cette possibilité et proposent une interprétation alternative en termes de mutations au hasard : si la sélection naturelle favorise des organismes ayant des caractéristiques acquises, elle agira de même pour les mutations au hasard produisant les mêmes caractéristiques sans la nécessité de les acquérir, et les caractéristiques deviendront donc héréditaires. Cette simulation hypothétique de l'hérédité des caractéristiques acquises est parfois nommée l'effet de Baldwin, du nom de l'un des théoriciens de l'évolution qui fut le premier à la suggérer. (6)

Au début du siècle, des dizaines de scientifiques prétendirent avoir démontré l'hérédité des caractéristiques acquises chez diverses espèces animales et végétales. (7) Les antilamarckiens réfutèrent leurs exemples, en citant toujours la fameuse expérience de Weismann, au

cours de laquelle il coupa les queues de vingt-deux générations successives de souris et constata que leur progéniture naissait toujours avec une queue. Un autre argument attirait l'attention sur le fait qu'en dépit de maintes générations d'hommes circoncis, les Juifs naissaient toujours avec un prépuce.

Après le suicide de P. Kammerer, un des leaders lamarckiens, en 1926, le Mendélisme s'établit en Occident tel une orthodoxie pratiquement incontestée. (8) Pendant ce temps, en Union soviétique, les adeptes de l'hérédité des caractéristiques acquises, conduits par T.D. Lyssenko, s'assuraient du contrôle de l'institution biologique dans les années 30 et conservaient leur suprématie jusqu'en 1964. Durant cette période, nombre de leurs adversaires Mendéliens furent persécutés. (9) Cette fixation suscita amertume et dogmatisme chez les uns comme chez les autres.

Il existe désormais des preuves substantielles attestant du fait que les caractéristiques acquises peuvent vraiment être héritées ; le problème est devenu une question d'interprétation. Dans une importante série d'expériences, C.H. Waddington affirmait qu'exposer les œufs ou chrysalides de populations de type sauvage de mouches du vinaigre aux vapeurs d'éther ou à des températures élevées provoquait un développement anormal chez certaines des mouches. (10) La génération suivante fut obtenue à partir de ces mouches anormales, et les œufs ou chrysalides furent à nouveau exposés au stress environnemental ; on sélectionna encore des spécimens anormaux et on procéda à des croisements, etc. Dans les générations successives, la proportion d'insectes anormaux augmenta. Après un certain nombre de générations (dans certains cas 14, dans d'autres 20 ou plus) quand la progéniture des mouches anormales se développa *sans* le stress environnemental dans un environnement normal, des spécimens présentaient encore les anomalies caractéristiques. En outre, celles-ci se manifestaient chez leurs descendants élevés en des conditions normales. Selon Waddington :

« Toutes ces expériences démontrent que si la sélection se déroule pour l'apparition d'un caractère acquis dans un environnement anormal particulier, les déformations sélectionnées qui en résultent sont susceptibles de présenter ce caractère même lorsqu'elles sont replacées dans un environnement normal » (11).

Waddington envisagea la possibilité que quelque influence physique ou chimique, par le biais de structures altérées chez les mouches anormales, pouvait avoir induit des modifications transmissibles dans leurs gènes (12), mais il la rejeta parce que l'état des recherches en biologie moléculaire rendaient un tel mécanisme improbable. (13) Son interprétation définitive insistait à la fois sur le rôle de sélection pour le potentiel génétique à répondre au stress environnemental par un développement anormal et sur la « canalisation du développement » impliquée dans la morphogenèse modifiée. « Pour utiliser un langage quelque peu imagé nous dirons que la sélection n'abaissait pas simplement un seuil, mais qu'elle déterminait dans quelle direction le système en développement se réaliserait après avoir franchi ce seuil. » (14) Waddington inventa le mot *chréode* pour exprimer la notion de développement dirigé, canalisé. Il pensait à la détermination de la direction prise par une chréode en fonction de son « harmonisation ». Mais il n'expliqua pas comment cette canalisation et cette « harmonisation » se produisaient, hormis en émettant la vague suggestion qu'elles dépendaient d'une manière ou d'une autre de la sélection des gènes. (15)

L'hypothèse de la causalité formative complète l'interprétation de Waddington : les chréodes et les formes finales vers lesquelles elles sont dirigées dépendent de la résonance morphique des organismes antérieurs semblables ; l'« héritage des caractéristiques acquises » tel qu'étudié par Waddington dépend *tant* de la sélection génétique *que* d'une influence directe par résonance morphique des systèmes dont le développement a été modifié en réponse à des environnements anormaux.

Des voies de morphogenèse modifiées — que ce soit par des facteurs environnementaux ou génétiques — tendront en général à canaliser et à stabiliser des processus semblables de morphogenèse dans des organismes semblables subséquents par la résonance morphique. La force de cette influence dépendra de la spécificité de la résonance et du nombre d'organismes semblables précédents dont la morphogenèse a été modifiée ; ce nombre tendra à être important si les altérations ont été induites par la sélection naturelle ou artificielle, et insignifiant dans le cas contraire.

Des mutilations de structures tout à fait formées ne modifieraient pas leurs voies de morphogenèse à moins qu'elles ne soient régénérées. Des mutilations de structures qui ignorent la régénération ne devraient donc pas influencer le développement d'organismes subsé-

quents. Cette conclusion confirme que l'amputation des queues des souris et que la circoncision des Juifs ne comportent aucun effet héréditaire significatif.

NOTES

- (1) Morata et Lawrence (1977).
- (2) Snode (1974).
- (3) Fisher (1930).
- (4) Haldane (1939).
- (5) Serra (1966).
- (6) Baldwin (1902).
- (7) Cf Semon (1912) et Kammerer (1924).
- (8) Kœstler (1971).
- (9) Medvedev (1969).
- (10) Des compte-rendus des expériences ont été rassemblés dans l'ouvrage de Waddington (1975).
- (11) Ibid.
- (12) Waddington (1957).
- (13) Voir la discussion entre C.H. Waddington et A. Kœstler dans l'ouvrage édité par Kœstler et Smythies (1969).
- (14) Waddington (1975).
- (15) Ibid.

CHAPITRE 8

L'ÉVOLUTION DES FORMES BIOLOGIQUES

8.1. La théorie néo-darwinienne de l'évolution

Nous ne possédons que peu de détails quant à l'évolution dans le passé. Et l'évolution ne se prête pas facilement à l'observation dans le présent. Même sur une échelle mesurée en millions d'années, l'apparition d'une espèce nouvelle est exceptionnelle, et celles de genres, de familles et d'ordres plus exceptionnelles encore. Les changements évolutionnaires observés durant le dernier siècle concernent pour la plupart le développement de nouvelles variétés ou races au sein d'espèces établies. Les exemples les mieux documentés concernent l'émergence de races de couleur foncée de plusieurs lépidoptères européens dans des régions où la pollution industrielle a conduit au noircissement des surfaces sur lesquelles ils s'installaient. La sélection naturelle engendrait des mutants foncés afin de mieux les camoufler et donc de mieux les soustraire à la prédation des oiseaux.

Compte tenu de la quasi absence d'une preuve directe et du défaut de possibilités de vérification expérimentale, toute interprétation du mécanisme de l'évolution est spéculative : elle consistera principalement en une élaboration de ses suppositions initiales quant à la nature de l'héritage et quant aux sources de la variation transmissible puisque les faits détaillés ne la limitent pas.

Une interprétation mécaniste orthodoxe est fournie par la théorie néo-darwinienne, qui diffère de la théorie darwinienne originale à deux égards : premièrement, elle affirme que l'hérédité est explicable en termes de gènes et de chromosomes ; et deuxièmement, que la

source ultime de variabilité transmissible est la mutation au hasard du matériel génétique. Les principales caractéristiques de cette théorie peuvent être ainsi résumées :

- 1) Les mutations interviennent au hasard.
- 2) Les gènes sont recombinaisonnés lors de la reproduction sexuée par les crossing-overs des chromosomes et par des modifications de la structure chromosomique. Ces processus engendrent de nouvelles permutations des gènes susceptibles d'induire de nouveaux effets.
- 3) La propagation d'une mutation favorable est susceptible d'être plus rapide dans de petites populations et brassées que dans des populations de taille supérieure. Dans les petites populations ou dans les populations de taille moyenne soumises à de vastes fluctuations, les gènes mutants sont parfois perdus ou préservés au hasard par une « dérive génique » plutôt qu'ils ne résultent de la sélection naturelle.
- 4) La sélection naturelle tend à éliminer des gènes mutants ayant des effets défavorables. Les agents de sélection incluent les prédateurs, les parasites et les maladies infectieuses, la compétition pour l'espace, la nourriture, etc., les conditions climatiques et micro-climatiques ainsi que la sélection sexuelle.
- 5) De nouvelles pressions sélectives entrent en jeu en tant que résultats de changements dans les conditions environnementales et de modifications dans les modèles de comportement des organismes eux-mêmes.
- 6) Si des populations se séparent sur les plans géographique et écologique, ou pour toute autre raison, elles sont susceptibles d'évoluer de manière différente.
- 7) Dans le règne végétal en particulier, de nouvelles espèces apparaissent parfois, résultant d'hybrides inter-spécifiques qui, bien qu'habituellement stériles, deviennent quelquefois fertiles par suite de polyploïdie.

Certaines des caractéristiques principales de cette théorie ont été élaborées mathématiquement dans le champ de la génétique de la population théorique. Afin de construire des modèles mathématiques, on suppose en général dans un souci de simplicité que les gènes sont sujets à la sélection indépendamment les uns des autres (bien qu'en fait ils soient liés les uns aux autres dans les chromosomes et qu'ils interagissent dans leurs effets avec d'autres gènes). Puis on calcule les changements dans la fréquence génétique sur un nombre donné de générations en assignant des valeurs numériques aux pressions sélectives, aux taux de mutation et aux tailles de population.

Ces méthodes ont été étendues de manière à couvrir tous les aspects de l'évolution en postulant que les caractères morphologiques et que les instincts étaient déterminés par des gènes individuels ou par des combinaisons de gènes. (1)

Nombre de théoriciens néo-darwiniens prétendent que l'évolution divergente sous l'influence de la sélection naturelle sur de longues périodes de temps ne conduit pas seulement au développement de races, de variétés et de sous-espèces nouvelles, mais encore à des espèces, des genres, des familles et des phyla nouveaux. (2) Cette division a été discutée en se fondant sur le fait que les différences entre ces divisions taxonomiques supérieures étaient trop importantes pour résulter de transformations graduelles ; en dehors de toute autre chose, les organismes diffèrent souvent par le nombre et par la structure de leurs chromosomes. Plusieurs auteurs ont suggéré que ces changements évolutifs à grande échelle se produisaient soudainement en tant que résultats de macro-mutations. Des exemples contemporains de tels changements sont offerts par les animaux et par les végétaux monstrueux dans lesquels des structures ont été transformées, dupliquées ou supprimées. Des « monstres viables » ont parfois survécu ou se sont reproduits au cours de l'évolution. (3) Un argument avancé en faveur de cette opinion veut qu'alors que des changements graduels sous la pression sélective aboutiraient à des formes ayant une valeur adaptative précise (sauf peut être chez certaines petites populations soumises à une « dérive génique »), des macro-mutations produiraient diverses variations apparemment gratuites à grande échelle qui seraient éliminées par la sélection naturelle à la condition qu'elles soient défavorables, contribuant donc à expliquer la diversité prodigieuse des organismes vivants. (4)

Ces auteurs soulignent l'importance des changements conséquents et soudains, mais ils ne réfutent pas les suppositions orthodoxes voulant que l'évolution en tant que tout dépende uniquement de mutations au hasard et d'héritage génétique associés à la sélection naturelle.

Des critiques plus radicaux contestent ces principes fondamentaux eux-mêmes, arguant qu'il est difficile de concevoir que toutes les structures adaptatives et que tous les instincts des organismes vivants soient apparus au hasard, même en admettant que la sélection naturelle ne permettra aux organismes de survivre et de se reproduire que s'ils sont suffisamment bien adaptés pour le faire. En outre, ils prétendent que certains exemples d'évolution parallèle et convergente

dans lesquels des caractères morphologiques très proches apparaissent indépendamment en groupes taxonomiques différents, indiquent l'intervention de facteurs inconnus dans l'évolution, et ceci même en admettant des pressions sélectives parallèles. D'aucuns objectent à l'affirmation mécaniste implicite ou explicite que l'évolution en tant que tout est absolument dépourvue d'objectifs. (5)

Le refus métaphysique de toute action créative ou de tout objectif dans le processus évolutif découle de la philosophie du matérialisme, à laquelle la théorie mécaniste est intimement liée. (6) A moins que les résultats scientifiques et métaphysiques soient définitivement réduits à néant, il convient de considérer la théorie néo-darwinienne comme une hypothèse scientifique et non comme un dogme métaphysique au sein du contexte limité de la science empirique. En tant que telle, elle peut difficilement être tenue pour prouvée : elle offre tout au plus une interprétation plausible du processus d'évolution sur la base de ses suppositions en ce qui concerne l'héritage génétique et le hasard des mutations.

L'hypothèse de la causalité formative permet d'envisager sous un jour nouveau l'hérédité et conduit donc à une interprétation tout à fait différente de l'évolution. Elle admet la supposition néo-darwinienne voulant que les mutations génétiques relèvent du hasard, mais elle ne confirme ni n'infirme la métaphysique du matérialisme. (Section 8.7)

8.2. Les mutations

Si des organismes se développaient dans les mêmes environnements génération après génération et transmettaient des gènes et des chromosomes identiques à leur descendance, les effets combinés de l'héritage génétique et de la résonance morphique conduiraient à une répétition indéfinie des formes anciennes et semblables. Mais en fait des changements sont imposés aux organismes tant de l'intérieur par la mutation génétique que de l'extérieur par des modifications environnementales.

Les mutations sont des changements accidentels dans la structure des gènes ou des chromosomes, individuellement imprévisibles non seulement en pratique mais encore en principe, parce qu'ils dépendent d'événements probabilistes. Il n'existe aucune raison de douter qu'ils relèvent du hasard comme le suppose la théorie néo-darwinienne.

Maintes mutations ont des effets qui sont si défavorables à la santé qu'elles en sont fatales. Mais parmi les moins sévères, certaines affectent la morphogenèse à travers des influences quantitatives sur les voies de la morphogenèse, et engendrent des écarts par rapport aux formes normales (Section 7.3) ; et d'autres affectent des germes morphogénétiques de telle façon que des voies complètes de morphogenèse sont bloquées ou remplacées par d'autres (Section 7.2).

Dans ces rares cas où les mutations conduisent à des changements favorisés par la sélection naturelle, non seulement la proportion des gènes mutants dans la population tendra à augmenter ainsi que le prétend la théorie néo-darwinienne, mais encore la répétition de nouvelles voies de morphogenèse en accroissant le nombre des organismes renforcera les nouvelles chréodes : non seulement le génotype, mais encore les champs morphogénétiques d'une espèce changeront et évolueront en tant que résultats de la sélection naturelle.

8.3 La divergence des chréodes

Si une mutation ou un changement environnemental perturbe une voie normale de morphogenèse à un stade relativement précoce, la régulation du système lui permettra cependant de produire une forme finale normale. Si ce processus se répète génération après génération, le détournement des chréodes sera stabilisé par la résonance morphique ; en conséquence toute une race ou variété d'une espèce suivra une voie anormale de morphogenèse tandis qu'elle s'achèvera toujours sur la forme finale habituelle. En fait de nombreux cas de prétendues déviations temporaires dans le développement ont été décrits. Par exemple, chez le turbellarié *Prorhynchus stagnitilis*, le zygote se clive soit en spirale soit de manière radiale, et les embryons en développement croissent soit à l'intérieur du vitellus soit à sa surface. Certains des organes se forment en séquences différentes en raison de ces différences au début de l'embryogenèse ; les animaux adultes sont néanmoins identiques. Et dans une espèce unique du ver annelé *Nereis*, il existe deux types de larve qui se développent en une seule et même forme finale adulte. (7) Les déviations temporaires sont parfois adaptatives par exemple aux conditions de la vie larvaire, mais elles interviennent presque toujours sans raison apparente.

Les divergences de chréodes qui ne sont pas pleinement corrigées par la régulation et qui donc donnent naissance à des variantes de

formes finales possèdent une plus grande signification évolutive. De tels changements dans la voie de développement résulteraient soit de mutations (cf Section 7.3) soit de conditions environnementales inhabituelles (cf Section 7.6). Dans le cas de mutation dans un environnement inchangé, si la forme finale aberrante présente un avantage sélectif, les gènes mutants augmenteraient en fréquence au sein de la population, et la nouvelle chréode sera de plus en plus renforcée par la résonance morphique. Dans le cas le plus complexe où une forme variante se manifeste en réponse à des conditions environnementales inhabituelles et présente un avantage sélectif, la nouvelle chréode sera renforcée comme auparavant et la sélection opérera de manière simultanée en faveur de ces organismes possédant la capacité génétique de répondre ainsi (cf les expériences de Waddington sur les mouches du vinaigre, Section 7.7). Les caractéristiques acquises deviennent donc héréditaires via la sélection génétique et la résonance morphique.

En des conditions naturelles, l'opération de différentes pressions sélectives sur des populations d'une espèce isolée sur les plans géographique et écologique résultera en une divergence à la fois de leurs génotypes et de leurs chréodes. D'innombrables espèces d'animaux et de végétaux se sont en fait différenciées en des races et en des variétés distinctes génétiquement et morphologiquement ; les animaux domestiques et les plantes cultivées fournissent des exemples familiers. (8) Songez à l'extraordinaire diversité des races canines, allant de l'Afghan au Pékinois.

Dans certains cas, la divergence morphologique n'affecte qu'une structure particulière ou un petit groupe de structures tandis que d'autres ne sont guère affectées. Par exemple chez le petit poisson *Belone acus*, les mâchoires aux premiers stades de développement ressemblent à celles d'espèces voisines, mais elles se développent ensuite en un museau très étiré. (9) Maintes exagérations structurales ont évolué sous l'influence de la sélection sexuelle, par exemple les bois des cerfs. Les fleurs offrent des milliers d'exemples de développement divergent dans leurs différentes parties composantes : comparez par exemple les modifications des pétales chez différentes espèces d'orchidées.

Dans d'autres cas, la forme de maintes structures a changé de manière corrélative. En fait, si les formes varient de façon uniforme et harmonieuse, elles se prêtent à la comparaison graphique par la distorsion systématique des coordonnées superposées (Fig. 20) ainsi

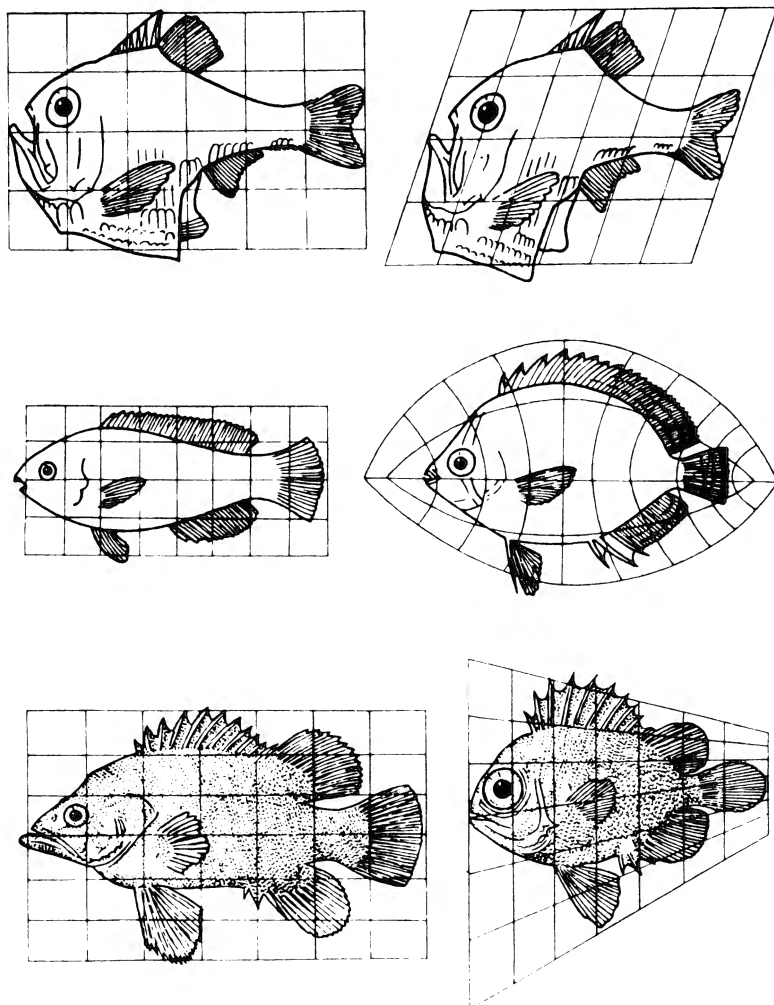


FIGURE N° 20. Comparaison des formes de différentes espèces de poisson (Thompson, 1942. Reproduit avec l'autorisation de Cambridge University Press).

que Sir d'Arcy Thompson l'a montré dans le chapitre de son essai *On Growth and Form* intitulé « la théorie des Transformations, ou la Comparaison des Formes Apparentées ».

Ces types de changement évolutif se déroulent dans le contexte de champs morphogénétiques préexistants. Ils produisent des variations sur des thèmes donnés. Mais ils n'expliquent pas ces thèmes. Selon Thompson :

« Nous ne pouvons pas transformer un invertébré en un vertébré, ni un coérenté en un ver, par aucune déformation simple et légitime, ni par aucune réduction insuffisante des principes élémentaires... La ressemblance de forme, dont nous dépendons comme d'un guide sûr pour les affinités des animaux dans certaines limites de parenté et de proximité, cesse dans certains autres cas de nous servir, parce que dans certaines circonstances elle cesse d'exister. Nos analogies géométriques pèsent lourd contre la conception de Darwin de petites variations continues et sans fin ; elles aident à montrer que des variations discontinues sont choses naturelles, que... des changements soudains, plus ou moins conséquents n'ont pas manqué d'intervenir et de nouveaux « types » d'apparaître ». (10)

8.4. La suppression des chréodes

Alors que la divergence des chréodes dans les champs morphogénétiques existants permet des variations de formes continues ou quantitatives, les modifications du développement impliquant la suppression de chréodes ou la substitution d'une chréode à une autre résultent en des discontinuités qualitatives. Selon l'hypothèse de la causalité formative, ces effets sont dus à des mutations ou à des facteurs environnementaux qui modifient les germes morphogénétiques (Section 7.2). La figure 18 représente la feuille d'un pois mutant sur laquelle les folioles se substituent aux vrilles et la figure 17 un « bithorax » de la *Drosophila* mutante.

Il est probable que de tels changements se sont produits souvent au cours de l'évolution. Par exemple les feuilles de certaines espèces d'*acacia* ont été supprimées et leurs rôles repris par des phyllodes aplatis. Ce processus est observable chez les jeunes plants où les premières feuilles formées sont typiquement pennées (Fig. 21). Chez les cactées, les feuilles ont été remplacées par des épines. Parmi les insectes, dans la plupart des ordres, il existe des espèces dont les ailes ont été supprimées chez les deux sexes, comme chez certaines mouches parasites, ou chez un seul des deux sexes, comme chez la femelle coléoptère connue sous le nom de ver luisant. Chez les fourmis, les larves femelles se développent soit en des reines ailées soit en des ouvrières dépourvues d'ailes selon la composition chimique de leur régime alimentaire.

Chez certaines espèces, les formes juvéniles acquièrent la maturité

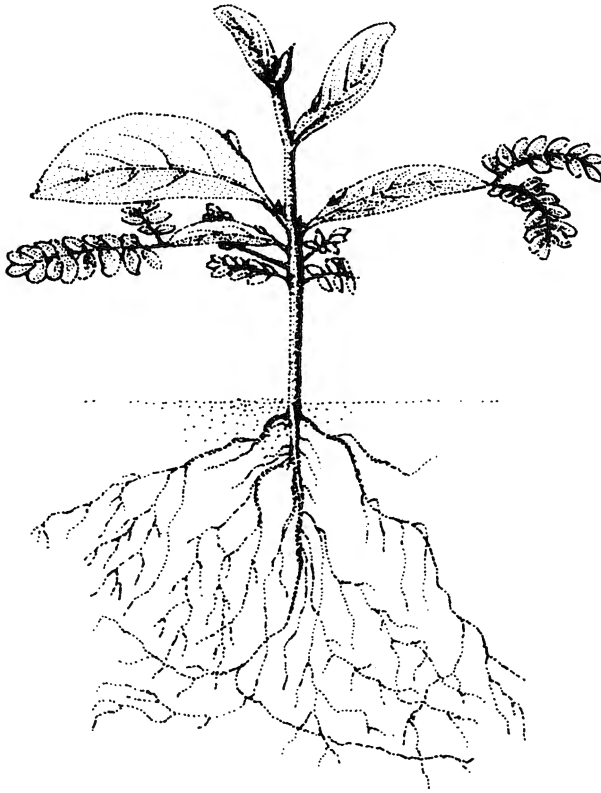


FIGURE N° 21 : un jeune plant d'*acacia* (d'après Goebel, 1898).

sexuelle et se reproduisent sans jamais présenter les structures caractéristiques de l'adulte, qui sont en quelque sorte court-circuitées. L'exemple classique est celui de l'axolotl, la larve de l'*Ambystoma tigrinum*, qui atteint sa taille maximum et parvient à la maturité sexuelle sans perdre ses caractéristiques larvaires. Si l'on administrait de l'hormone thyroïde à un axolotl, il se métamorphoserait en une forme adulte pourvue de poumons et sortirait de l'eau pour vivre sur terre.

Les exemples les plus extrêmes de la suppression de chréodes se rencontrent chez les parasites, certains d'entre eux ont pratiquement perdu toutes les structures caractéristiques des individus apparentés.

8.5. La répétition des chréodes

Dans tous les organismes multicellulaires, certaines structures sont répétées plusieurs fois : les tentacules de l'Hydra, les bras de l'étoile de mer, les pattes des mille-pattes, les plumes des oiseaux, les feuilles des arbres, etc. Maints organes sont constitués d'unités structurales répétées : les tubules des reins, les segments des fruits, etc. Et à un niveau microscopique, les tissus renferment des milliers ou des millions de copies d'un petit nombre de cellules de base.

Si suite à des mutations ou à des changements environnementaux, des germes morphogénétiques supplémentaires se forment au sein d'organismes en développement, certaines structures sont alors répétées plus souvent que d'habitude. Un exemple familier en horticulture est celui des fleurs « doubles » présentant des pétales additionnels. Des nouveau-nés humains naissent quelquefois avec des doigts ou des orteils supplémentaires. Et maints exemples de structures anormalement duplicatives se trouvent dans les textes de tératologie, allant des veaux à deux têtes aux monstrueuses poires multiples (Fig. 22).

Lors du développement de ces structures additionnelles, la régulation intervient de manière à les intégrer plus ou moins complètement au reste de l'organisme : par exemple, les pétales supplémentaires des fleurs doubles présentent des connexions vasculaires normales et les doigts et les orteils supplémentaires ont une alimentation sanguine et une innervation correctes.

Que la duplication des unités structurales ait joué un rôle essentiel dans l'évolution de nouveaux types d'animaux ou de végétaux est évident d'après les répétitions structurales au sein d'organismes existants. En outre, maintes structures d'animaux et de végétaux, qui sont à présent différentes les unes des autres, peuvent avoir évolué à partir d'unités originelles semblables. Ainsi présume-t-on que les insectes ont évolué à partir de créatures ressemblant à des mille-pattes primitifs, dotées d'une série de segments plus ou moins identiques, chacun portant une paire de pattes comme appendice. Les appendices sur les segments antérieurs peuvent avoir engendré les mandibules et les antennes, tandis que les segments eux-mêmes fusionnaient pour former la tête. A l'extrémité postérieure, certains des appendices peuvent avoir été modifiés pour réaliser les structures concernant l'accouplement et la manipulation des œufs. Les appendices furent supprimés dans les segments abdominaux mais dans les

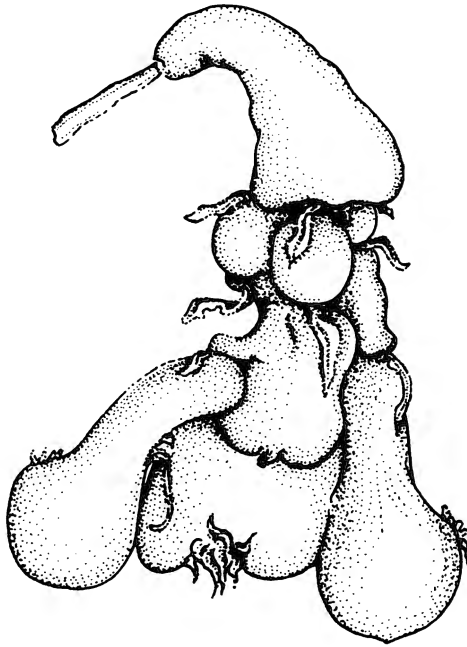


FIGURE N° 22 : une poire monstrueuse (d'après Masters, 1869).

trois segments thoraciques, ils furent maintenus et formèrent les pattes de l'insecte moderne. (11)

Une telle divergence de chréodes à l'origine semblables n'aurait été possible que si les germes morphogénétiques segmentaux s'étaient différenciés l'un l'autre dans leur structure ; dans le cas contraire ils auraient continué à s'associer par résonance morphique aux mêmes champs morphogénétiques. Et même chez les insectes modernes, si cette diversification de la primordium segmentale échouait à intervenir durant les premiers stades de l'embryogenèse, les différences normales entre les segments seraient perdues. C'est précisément ce qui semble se produire chez la mouche du vinaigre *Drosophila* en tant que résultat de mutations dans le complexe génique « bithorax » ; certaines transforment les structures du troisième segment thoracique en celles du second, ainsi la mouche porte-t-elle deux paires d'ailes au lieu d'une (Fig. 17) ; certaines transforment les segments abdominaux en des segments de type thoracique, portant des pattes ;

d'autres ont l'effet inverse, c'est-à-dire qu'elles transforment les segments thoraciques en segments abdominaux. (12)

8.6. L'influence des autres espèces

Les éleveurs d'animaux et les horticulteurs ont observé depuis longtemps que des variétés cultivées engendraient de temps à autres une descendance ressemblant au type sauvage ancestral. En outre, quand deux variétés cultivées distinctes étaient croisées, les caractéristiques de leur descendance ne ressemblait parfois à aucun des types parentaux, mais plus à ceux de leurs ancêtres sauvages. On nomme ce phénomène « réversion » ou « atavisme ». (13)

Dans un contexte évolutif, certaines sortes d'anomalies morphologiques peuvent de la même manière être considérées comme des réversions à des modèles de développement d'espèces ancestrales plus ou moins éloignées. Par exemple la formation anormale de deux paires d'ailes dans les mutants de « bithorax » la *Drosophila* (Fig. 17) a été interprétée comme un « retour » au type de développement caractéristique des ancêtres à quatre ailes des mouches. (14) Maints autres exemples d'atavisme putatifs figurent dans la littérature consacrée à la tératologie. (15) Ces interprétations ne peuvent qu'être spéculatives, mais elles ne sont pas nécessairement tirées par les cheveux. Des mutations ou des facteurs environnementaux anormaux sont susceptibles d'engendrer des conditions internes dans les tissus embryonnaires, qui ressemblent à ceux des types ancestraux, ayant des conséquences morphogénétiques semblables.

Chez la plupart des végétaux et des animaux, seule une faible proportion, peut-être moins de 5 %, de l'ADN chromosomique renferme des gènes codant les protéines des organismes. La fonction de la majeure partie de l'ADN est inconnue. Une certaine quantité jouerait un rôle dans le contrôle de la synthèse des protéines ; une autre jouerait un rôle structural dans les chromosomes et une autre encore consisterait en des gènes ancestraux « redondants » ne se manifestant plus. On a suggéré que si une mutation — due par exemple à une réorganisation de la structure chromosomique — conduisait à la manifestation de tels gènes « latents », des protéines caractéristiques d'ancêtres éloignés pourraient soudain être à nouveau produites, aboutissant parfois à la réapparition de structures depuis longtemps disparues. (16)

Dans l'esprit de l'hypothèse de la causalité formative, si de tels

changements amènent un germe morphogénétique à adopter une structure et un modèle vibratoire semblables à ceux d'une espèce ancestrale, il se trouvera sous l'influence d'un champ morphogénétique de cette espèce, en dépit du fait qu'elle soit éteinte depuis des millions d'années. Cet effet ne se limite pas aux types ancestraux. Si suite à une mutation (ou toute autre raison) une structure d'un germe dans un organisme en développement devient suffisamment semblable à un germe morphogénétique d'une autre espèce, contemporaine ou éteinte, elle « s'accordera » à une chréode caractéristique de cette autre espèce. Et si les cellules possédaient la faculté de synthétiser les protéines appropriées, le système se développerait alors réellement sous son influence.

Au cours de l'évolution, des structures très proches semblent parfois être apparues tout à fait indépendamment chez des lignées de parenté plus ou moins éloignées. Par exemple, parmi les escargots de terre méditerranéens, des espèces appartenant à un genre bien différencié, identifiables par leur appareil génital, ont des coquilles dont les formes et les structures sont presque identiques ; des genres d'ammonites fossiles montrent le développement parallèle répété des coquilles carénées et sillonnées ; et on rencontre des modèles d'ailerons semblables ou identiques chez des familles distinctes de papillons. (17)

Si une mutation s'étant produite dans un organisme « s'accorde » aux chréodes d'une autre espèce et développe en conséquence des structures caractéristiques de celle-ci, il sera rapidement éliminé par la sélection naturelle si ces structures compromettent ses chances de survie. D'un autre côté, s'il est favorisé par la sélection naturelle, la proportion de tels organismes dans la population tendra à augmenter. En fait les pressions sélectives qui favorisent cette augmentation pourraient très bien ressembler à celles qui favorisaient l'évolution originale de ce caractère particulier chez cette autre espèce. Et rien n'interdit d'avancer que la ressemblance structurale est parfois délibérément favorisée parce qu'elle permet à l'organisme d'imiter les membres de cette autre espèce. Ainsi les parallélismes dans l'évolution dépendent-ils souvent à la fois d'une espèce « captant » les champs morphogénétiques d'une autre, et de pressions sélectives parallèles.

D'un autre côté, des pressions sélectives similaires conduisent également à l'évolution convergente de structures superficiellement semblables chez différentes espèces via la modification de différents

champs morphogénétiques. Mais il sera impossible en de tels cas que les structures interagissent par résonance morphique sauf si elles se ressemblent étroitement les unes les autres dans les détails internes aussi bien que dans les formes externes.

8.7. L'origine des formes nouvelles

Selon l'hypothèse de la causalité formative, la résonance morphique et l'héritage génétique expliquent la répétition des modèles caractéristiques de morphogenèse pour des générations successives de végétaux et d'animaux. En outre, les caractéristiques acquises en réponse à l'environnement deviennent parfois héréditaires grâce à une combinaison de résonance morphique et de sélection génétique. La suppression ou la répétition des chréodes sont susceptibles de modifier la morphologie des organismes ; et quelques exemples surprenants d'évolution parallèle sont imputables au « transfert » de chréodes d'une espèce à une autre.

Cependant, ni la répétition ni la modification ni l'addition ni la soustraction ni la permutation de champs morphogénétiques existants n'expliquent l'origine de ces champs eux-mêmes. Néanmoins au cours de l'évolution, de toutes nouvelles unités morphiques et leurs champs morphogénétiques doivent apparaître : celles des organites, celles des types fondamentaux de cellules, de tissus et d'organes, ainsi que celles des sortes fondamentalement différentes de végétaux et d'animaux inférieurs et supérieurs.

Des mutations génétiques et des environnements anormaux peuvent avoir fourni les occasions des premières apparitions de nouvelles unités morphiques biologiques, mais les formes de leurs champs morphogénétiques ne peuvent avoir été entièrement déterminées ni par la causalité énergétique ni par des causes formatives pré-existantes (Section 5.1). Savoir si un champ morphogénétique tire ses origines soudainement d'un large « saut » ou progressivement d'une série de « sauts » plus petits est une question de conjecture. Quoi qu'il en soit les nouvelles formes adoptées lors de ces « sauts » sont inexplicables dans le cadre de la science en termes de causes précédentes.

L'origine des formes nouvelles est imputable soit à une activité créatrice d'un acte dominant et transcendant la nature, soit à une impulsion créative immanente à la nature, soit au hasard aveugle et sans but. Mais nul ne pourra jamais choisir entre ces possibilités

métaphysiques sur la base d'une hypothèse scientifique vérifiable empiriquement. La question de la créativité évolutive ne peut qu'être laissée en suspens du point de vue de la science naturelle.

NOTES

- (1) Voir par exemple Wilson (1975).
- (2) Le lecteur trouvera des déclarations sur la position néo-darwinienne chez Huxley (1942), chez Rensch (1959), chez Mayr (1963) et chez Stebbins (1974).
- (3) Goldschmidt (1940) ; Gould (1980).
- (4) Willis (1940) avança cet argument ainsi que de nombreux exemples.
- (5) Il est possible que la critique la plus constructive de la théorie mécaniste de l'évolution demeure *l'Évolution créatrice* (1907) de H. Bergson. Ce dernier ne prétend pas que l'évolution en tant que tout dispose d'un objectif et d'une direction. Ce cas est avancé par Theillard de Chardin (1959). Pour une discussion récente voir Thorpe (1978).
- (6) Voir par exemple Monod (1972).
- (7) Rensch (1959).
- (8) Pour de plus amples exemples constructifs, cf. Darwin (1875).
- (9) Rensch (1959).
- (10) Thompson (1942).
- (11) Wigglesworth (1964).
- (12) Lewis (1963, 1978).
- (13) Cf. le chapitre intitulé « Réversion et Atavisme » chez Darwin (1875).
- (14) Lewis (1978).
- (15) E.g. ; Penzig (1922). Pour des discussions récentes voir Dostal (1967) et Riedl (1978).
- (16) R.J. Britten *in* Duncan et Weston-Smith (1977).
- (17) Rensch (1959).

CHAPITRE 9

MOUVEMENTS ET CHAMPS MOTEURS

9.1. Introduction

La discussion dans les chapitres précédents concernait le rôle de la causalité formative dans la morphogenèse. Ce chapitre et les deux suivants traitent du rôle de la causalité formative dans le contrôle du mouvement.

Certains mouvements des végétaux et des animaux sont spontanés, c'est-à-dire qu'ils interviennent en l'absence de stimulus particulier émanant de l'environnement. D'autres mouvements se déroulent en réponse à des stimuli environnementaux. Il est évident que des organismes répondent de manière passive à de puissantes forces physiques — un arbre sera ébranlé par le souffle du vent, un animal sera emporté par un fort courant d'eau — mais maintes réponses sont actives et elles ne peuvent être expliquées en tant qu'effets physiques ou chimiques importants des stimuli sur l'organisme en tant que tout : ils révèlent la *sensibilité* de l'organisme à l'environnement. Cette sensibilité dépend en général de récepteurs spécialisés ou organes « sensoriels ».

La base physico-chimique de l'excitation de ces récepteurs spécialisés par des stimuli environnementaux a été étudiée en détails ; ceci vaut également pour la physiologie de l'influx nerveux et pour le fonctionnement des muscles et des autres structures motrices. Nos connaissances quant au contrôle et à la coordination du comportement sont cependant très limitées.

Dans ce chapitre nous avançons que la causalité formative orga-

nise des mouvements et donc le comportement de la même manière qu'elle organise la morphogenèse à travers les structures de probabilité des champs qui imposent un modèle et un ordre à des processus indéterminés sur le plan énergétique. Les similitudes entre la morphogenèse et le comportement ne sont pas évidentes à première vue, mais elles sont plus faciles à comprendre dans le cas des végétaux et des animaux unicellulaires telle que l'*Amœba* dont les mouvements sont essentiellement morphogénétiques.

9.2. Les mouvements des végétaux

Les végétaux bougent en croissant. (1) Il est plus facile d'apprécier ce fait en l'observant sur des films projetés en accéléré : les pousses se développent et s'orientent vers la lumière ; les racines pivotantes s'enfoncent dans le sol ; les extrémités des vrilles et les tiges grimpantes décrivent de grandes spirales dans les airs jusqu'à ce qu'elles entrent en contact avec un support solide et s'y enroulent. (2)

La croissance et le développement des végétaux se déroulent sous le contrôle de leurs champs morphogénétiques, qui leur confèrent leurs formes caractéristiques. Mais l'orientation de cette croissance est déterminée dans une large mesure par les stimuli directionnels de gravité et de lumière. Des facteurs environnementaux influencent également le type de développement : ainsi, les plantes faiblement exposées à la lumière s'étiolent-elles ; leurs pousses croissent en hauteur de manière relativement rapide jusqu'à ce qu'elles soient exposées à un éclairage plus vif.

La gravité est « ressentie » dans ses effets sur les grains d'amidon, lesquels roulent vers le bas et s'accumulent dans les parties inférieures des cellules. (3) La direction de la lumière est détectée par l'absorption différentielle d'énergie radiante sur les côtés illuminés et ombrés des organes par un pigment carotéroïde jaune. (4) Il se pourrait que le sens du « toucher » permettant aux tiges grimpantes et aux vrilles de localiser leurs supports solides implique la libération d'un corps chimique simple, l'éthylène, de la surface des cellules stimulées sur le plan mécanique. (5) Le passage d'une croissance étiolée à une croissance normale dépend de l'absorption de la lumière par un pigment protéique bleu nommé phytochrome. (6)

Les réponses à ces stimuli impliquent des changements physico-chimiques complexes dans les cellules et les tissus, et elles dépendent dans certains cas de la distribution différentielle d'hormones, telles

que l'auxine. Ces réactions ne peuvent cependant être expliquées uniquement en fonction de ces modifications physico-chimiques, elles ne sont intelligibles que dans le contexte d'ensemble des champs morphogénétiques des plantes. Par exemple, eu égard à leur polarité inhérente, les végétaux produisent des pousses à une extrémité et des racines à l'autre. Le stimulus directionnel de gravité oriente ce développement polarisé afin que les pousses croissent vers le haut et les racines vers le bas. L'action du champ gravitationnel sur les grains d'amidon dans les cellules et les changements conséquents dans la distribution hormonale sont en fait les causes de ces mouvements de croissance orientée, mais ils n'expliquent en eux-mêmes ni la polarité pré-existante ni le fait que les pousses et les racines réagissent en sens inverse ni les différentes habitudes de croissance des arbres, des herbes, des plantes grimpantes et rampantes ni les modèles particuliers de branchements dans les systèmes des pousses et des racines des différentes espèces. Toutes ces caractéristiques dépendent des champs morphogénétiques.

La plupart des mouvements des végétaux n'interviennent que dans les organes de croissance jeunes, certaines structures parvenues à maturité conservent cependant la faculté de bouger : par exemple, les fleurs qui s'ouvrent et qui se ferment quotidiennement, et les feuilles qui se replient la nuit. Ces mouvements sont influencés par l'intensité de la lumière et par d'autres facteurs environnementaux ; ils sont également placés sous le contrôle d'une « horloge physiologique » et ils continuent à intervenir à des intervalles quotidiens approximatifs, même si les plantes demeurent dans un environnement constant. (7) Les feuilles et les pétales s'ouvrent parce que les cellules spécialisées de la zone d'articulation située à leur base deviennent turgides ; ils se ferment quand ces cellules perdent leur eau eu égard à des changements dans la perméabilité de leurs membranes aux ions inorganiques. (8) Le recouvrement de la turgescence est un processus actif, requérant de l'énergie, comparable à la croissance.

En plus des mouvements de « sommeil », les feuilles de certaines espèces bougent au cours de la journée en réponse au changement de position du soleil. Par exemple, chez le *Cajanus Cajan*, les folioles exposées au soleil sont approximativement parallèles à ses rayons, exposant une surface minimum à la radiation tropicale intense. Mais les feuilles se trouvant à l'ombre s'orientent elles-mêmes à angle droit par rapport à la radiation incidente, interceptant ainsi la quantité maximum de lumière. Ces réactions dépendent de la direction et de

l'intensité de la lumière tombant sur les sites spécialisés à la base des pétioles, les pulvinus. Les feuilles et les folioles adaptent sans cesse leurs positions durant la journée au déplacement du soleil. Et la nuit, elles reprennent leurs positions de « sommeil » verticales : les pulvinus sont sensibles tant à la gravité qu'à la lumière.

Chez la plante « sensitive », *Mimosa pudica*, les folioles se referment et les feuilles pointent vers le bas la nuit, ainsi que le font nombre de légumineuses. Mais ces mouvements se produisent également durant la journée en réponse à la stimulation mécanique (Fig. 23). Le stimulus provoque une onde de dépolarisation électrique, semblable à un influx nerveux, qui traverse la feuille ; le stimulus s'étend aux autres feuilles qui se replient également s'il est suffisamment puissant. (9) De la même manière, chez la Dionée attrape-mouche, *Dionaea muscipula*, la stimulation mécanique des soies sensibles à la surface de la feuille contraint un influx électrique à traverser les cellules turgides de la zone d'articulation, lesquelles perdent rapidement leur eau ; les feuilles se referment tel un piège sur les infortunés insectes qui sont alors digérés. (10)

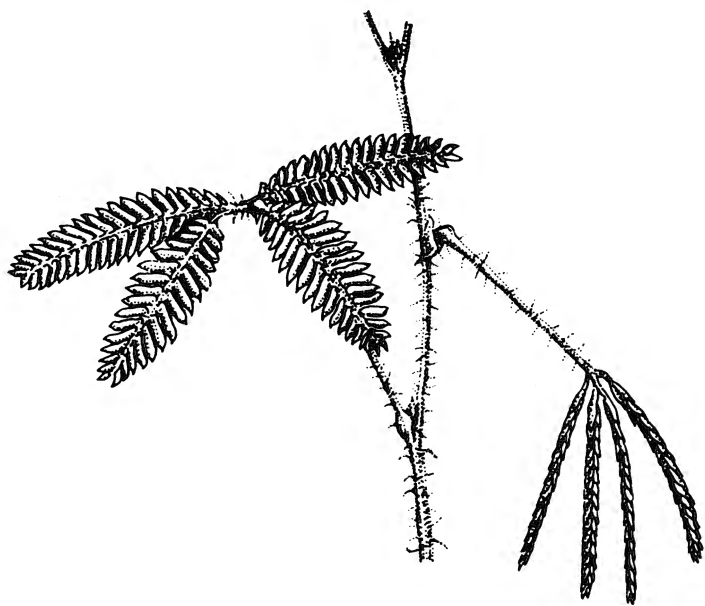


FIGURE N° 23. Feuilles de la plante sensitive, *Mimosa pudica*. A gauche, non stimulées ; à droite, stimulées.

Ces mouvements des feuilles et des folioles en réponse à la lumière, à la gravité et à la stimulation mécanique sont autorisés du fait que des cellules spécialisées sont capables de perdre de l'eau et de « grandir » à nouveau ; elles conservent en conséquence un potentiel morphogénétique simplifié, tandis que celui de la plupart des autres tissus est perdu lorsqu'ils arrivent à maturité et cessent de croître. Rien n'interdit de considérer les mouvements réversibles de ces structures spécialisées comme des cas limitatifs de morphogenèse dans lesquels les modifications de forme sont devenues stéréotypées et répétitives. Mais leur simplicité quasi-mécaniste est secondaire sur le plan évolutif ; elle a évolué à partir d'un domaine où la sensibilité aux stimuli environnementaux est associée à la croissance et à la morphogenèse du végétal en tant que tout.

9.3. Le mouvement amibien

Les amibes se déplacent par un flux cytoplasmique émis en prolongements grandissants, le pseudopode. Elles rampent normalement le long de la surface d'objets solides par l'extension continue de leur extrémité antérieure. Mais si ces pseudopodes sont touchés ou s'ils rencontrent la chaleur ou des solutions puissantes de divers agents chimiques, ils cessent de croître ; d'autres se développent à leurs places et les cellules changent ainsi de direction. Si les nouveaux pseudopodes rencontrent à nouveau des stimuli potentiellement nuisibles, ils s'arrêtent également, et l'amibe adopte une nouvelle direction. Ce système d'« essais et d'erreurs » se répète jusqu'à ce qu'elles trouvent un passage sans obstacle et libre de stimuli défavorables. (11)

Chez les amibes flottant librement et non exposées à un stimulus directionnel, il n'existe aucune direction privilégiée pour l'émission de pseudopodes ; ceux-ci continuent à se développer en diverses directions jusqu'à ce que l'un d'eux entre en contact avec une surface sur laquelle ils pourront ramper (Fig. 24).

L'extension du pseudopode se produit probablement sous l'influence d'un champ morphogénétique spécifique et polarisé. L'orientation selon laquelle de nouveaux pseudopodes commencent à se former dépend dans une certaine mesure de fluctuations aléatoires au sein des cellules ; les pseudopodes émis hors de la cellule sont alors réalisés grâce à l'organisation de filaments contractiles et d'autres structures au sein du cytoplasme. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que le développement du pseudopode soit inhibé par des

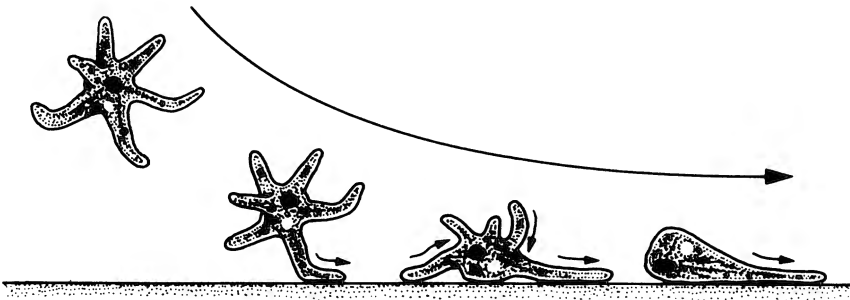


FIGURE N° 24. Méthode selon laquelle une amibe flottante passe à travers une surface solide (d'après Jennings, 1906).

stimuli environnementaux, ou par la compétition de pseudopodes croissant en d'autres directions.

Le fait que les mouvements amibiens dépendent de processus morphogénétiques continus est indiqué avec à propos par le nom spécifique de l'*Amoeba proteus*, une allusion au dieu de la mer qui changeait de formes.

L'amibe se nourrit en ingurgitant des corpuscules de nourriture, tels que des bactéries, par le mécanisme de la phagocytose : le pseudopode croît autour du corpuscule qui se trouve en contact avec la surface de la cellule ; les membranes du pseudopode fusionnent, et le corpuscule est enfermé dans la cellule entourée par un fragment de la membrane cellulaire. D'autres vésicules, dont l'enveloppe est de même type que la membrane cellulaire contenant les enzymes digestives, fusionnent avec cette vésicule de phagocytose et la nourriture est digérée. Ce type de morphogenèse est distinct de celle de la locomotion cellulaire et se déroule probablement sous l'influence d'un champ morphogénétique différent, dont l'orientation dépend du contact de la particule de nourriture potentielle avec la membrane. Rien n'interdit de considérer cette particule en contact avec la membrane comme le germe morphogénétique ; la forme finale est la particule engloutie dans la cellule. La chréode de phagocytose conduisant à cette forme finale est déterminée par la résonance morphique de tous les actes semblables de phagocytose par des amibes similaires et antérieures.

9.4. La morphogenèse répétitive de structures spécialisées

Les mouvements de la plupart des animaux dépendent des change-

ments de formes de certaines structures spécialisées plutôt que du corps en tant que tout.

Nombre d'organismes unicellulaires sont propulsés par le déplacement d'une excroissance ressemblant à un fouet, le flagelle ou cil vibratil, tandis que la forme du reste de la cellule demeure plus ou moins fixe (Fig. 25). Ces organites mobiles contiennent de longs éléments tubulaires semblables aux microtubules cytoplasmiques ; le changement de forme des protéines associées aux tubules engendre une force de glissement qui résulte en la flexion du flagelle ou cil vibratil. (12)

Chez les ciliés, les mouvements des nombreux cils individuels sont coordonnés afin que les ondes de battement parcourent toute la surface de la cellule. Cette coordination semble dépendre chez certaines espèces de l'influence mécanique des cils entre eux ; et chez d'autres, d'un système d'excitation à l'intérieur de la cellule, vraisemblablement associé aux fines fibrilles connectant les bases des cils. (13)

Si un cilié qui nage, par exemple *Paramecium*, rencontre un stimulus défavorable, la direction du battement ciliaire est inversée : l'organisme fait marche arrière et adopte ensuite une nouvelle direction. (14) Cette réaction de fuite est probablement induite par la pénétration de calcium ou d'autres ions dans la cellule suite à une altération de la perméabilité de la membrane due au stimulus. (15)

Le changement de forme du flagelle ou du cil qui bat, ainsi que le contrôle de ce battement, interviennent d'une manière si stéréotypée et si répétitive qu'elle semble presque mécanique.

Cette spécialisation quasi-mécanique de la structure et de la fonction est encore plus évidente chez les animaux multicellulaires. Des cellules entières ou des groupes de cellules sont spécialisés pour subir une morphogenèse répétée et simplifiée dans leurs cycles de contraction et de relaxation ; d'autres disposent d'une sensibilité spécialisée à la lumière, aux agents chimiques, à la pression, aux vibrations et autres stimuli ; et les nerfs, avec leurs axones très allongés, spécialisés pour conduire les influx électriques d'un endroit à un autre, reliant les organes sensoriels et les muscles à l'appareil nerveux ou système nerveux central.

9.5. Les systèmes nerveux

La contraction des cellules musculaires individuelles est coordonnée par des influx déterministes passant à travers les nerfs, tout

comme le battement du cil individuel à la surface d'un cilié est coordonné à ceux des cils voisins par des connexions physiques précises. Plusieurs cellules voisines activées par un seul nerf sont parfois contraintes de se contracter de manière simultanée. La contraction de différents groupes de cellules peut être coordonnée de manière rythmique, comme cela se produit dans un muscle qui maintient une tension un certain temps, quand l'activité de ce nerf fait partie d'un système de contrôle de niveau supérieur. Là encore, des systèmes de niveau supérieur contrôlent des cycles répétitifs de contraction dans différents muscles, par exemple dans les pattes de l'animal qui court. Ainsi les activités hautement hiérarchisées du système nerveux permettent-elles des degrés de coordination qui auraient été impossibles si les champs contrôlant les mouvements des organismes agissaient de manière directe sur les cellules musculaires.

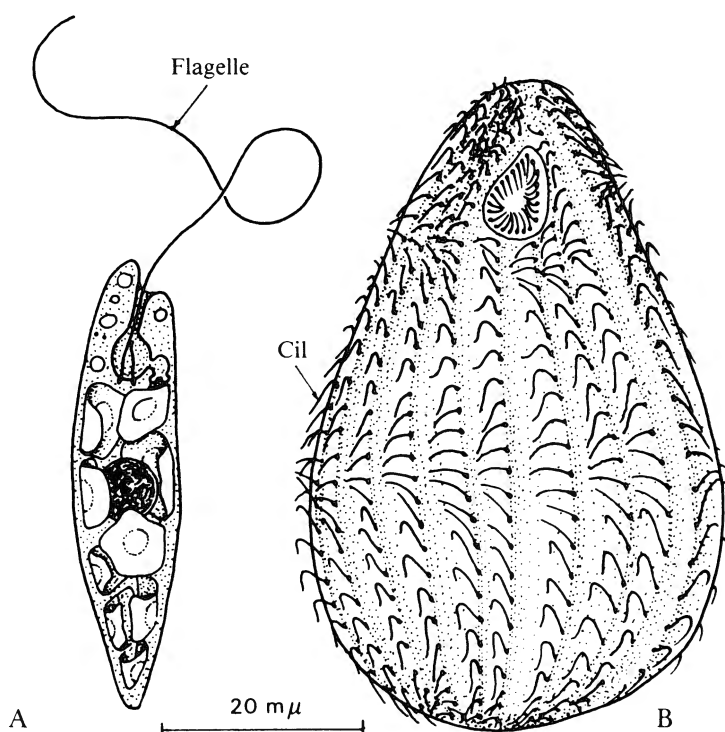


FIGURE N° 25.

A : Un flagellé, *Euglena gracilis* (d'après Raven et Co, 1976).

B : Un cilié, *Tetrahymena pyriformis* (d'après Mackinnon et Hawes, 1961).

Mais bien que d'un côté les nerfs fonctionnent de manière déterministe dans la transmission d'impulsions précises du style « tout ou rien » d'un endroit à un autre, d'un autre côté, la causalité formative ne serait pas capable de contrôler les mouvements des animaux à travers le système nerveux hormis si l'activité des nerfs était simultanément probabiliste, et ceci de manière inhérente. Ce qu'elle est en fait.

La production des impulsions nerveuses dépend de changements dans la perméabilité des membranes des cellules nerveuses aux ions inorganiques, en particulier au sodium et au potassium. Ces modifications sont dues soit à la stimulation électrique soit à des médiateurs chimiques spécifiques (par exemple acétylcholine) libérés au niveau des terminaisons nerveuses des jonctions synaptiques (Fig. 26). Nous savons depuis longtemps que l'excitation des nerfs par stimuli électriques voisins du niveau de tolérance se déroule de manière probabiliste. (16) Ceci tient au fait que le potentiel électrique à travers la membrane fluctue de manière aléatoire. (17) En outre, les changements dans les potentiels de la membrane post-synaptique provoqués par des médiateurs chimiques présentent également des fluctuations aléatoires (18) qui semblent être dues à l'ouverture et à la fermeture probabilistes de « canaux » ioniques à travers la membrane (19)

Il existe non seulement un probabilisme inhérent dans les réponses des membranes post-synaptiques aux médiateurs chimiques, mais encore dans la libération des médiateurs des terminaisons nerveuses pré-synaptiques. Les molécules médiatrices sont emmagasinées dans d'innombrables vésicules microscopiques (Fig. 26), et sont libérées dans l'espace synaptique lors de la fusion des vésicules et de la membrane. Ce processus se produit spontanément à intervalles fortuits donnant naissance à ce que l'on nomme des potentiels de plaque. Le taux de sécrétion s'élève de manière notoire quand une impulsion parvient à la terminaison nerveuse, mais là encore, la fusion des vésicules et de la membrane se déroule de manière probabiliste. (20)

A l'intérieur du cerveau, une cellule nerveuse typique a des milliers de prolongements filiformes qui se terminent en jonctions synaptiques sur les autres cellules nerveuses, et vice-versa, des prolongements de centaines ou de milliers d'autres cellules nerveuses se terminent en synapses à sa propre surface (Fig. 27). Certaines de ces terminaisons nerveuses libèrent des médiateurs excitateurs qui tendent à favoriser la production d'une impulsion ; d'autres sont inhibiteurs et diminuent la tendance du nerf à s'exciter. Le déclenchement des impulsions dépend en fait d'un équilibre entre les influences excita-

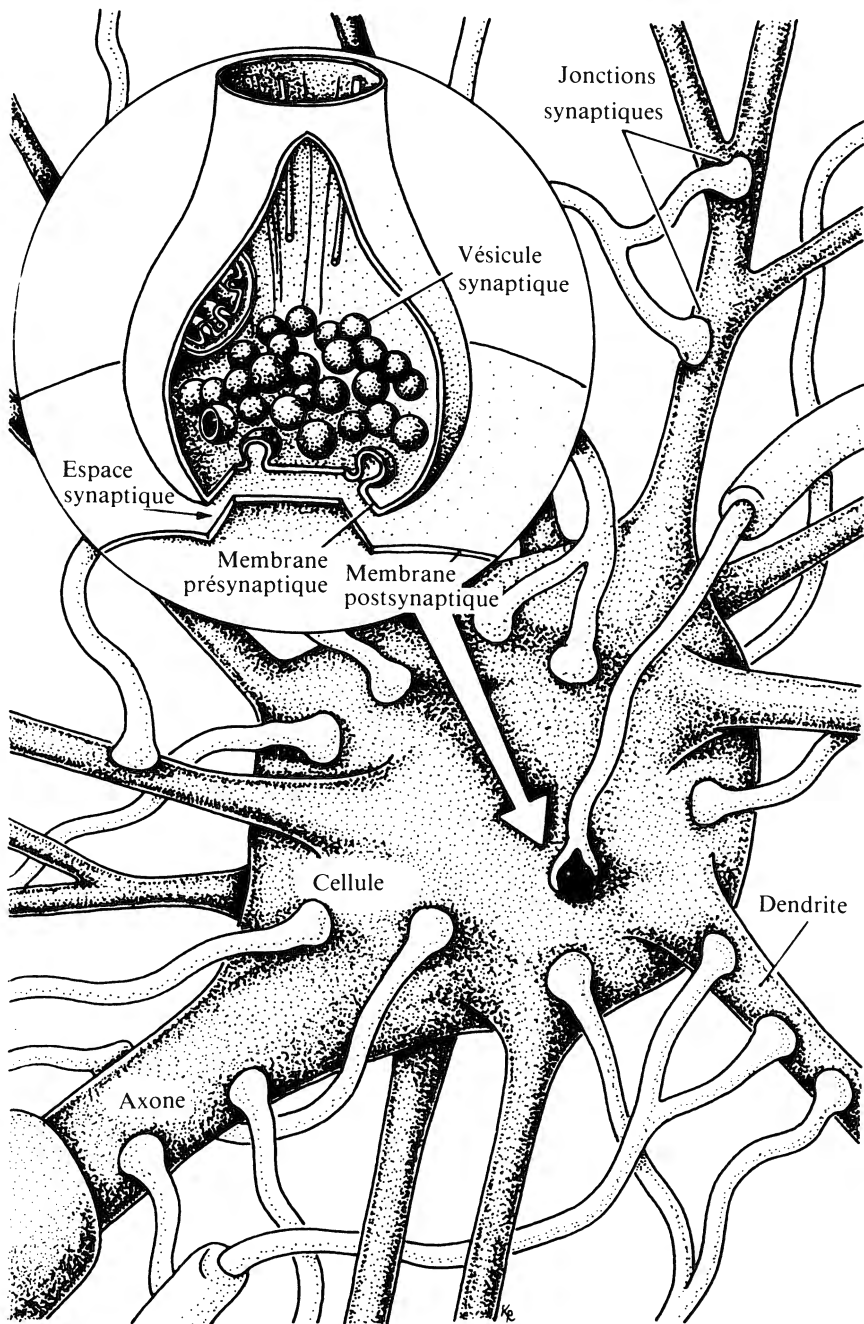


FIGURE N° 26. Partie d'une cellule nerveuse présentant de nombreuses synapses à sa surface. Le médaillon présente en détails une synapse individuelle. (d'après Krstić, 1979).

trices et inhibitrices de centaines de synapses. Il semble probable qu'à un moment donné dans maintes cellules nerveuses du cerveau cet équilibre soit si précaire que l'excitation se produit — ou ne se produit pas — suite à des fluctuations probabilistes dans les membranes cellulaires ou synapses.

Ainsi la propagation déterministe des impulsions nerveuses d'un endroit à un autre du corps est-elle associée à un haut degré d'indéterminisme dans le système nerveux central, lequel d'après la présente hypothèse, est organisé et structuré par la causalité formative.

9.6. Champs morphogénétiques et champs moteurs

Bien que les champs contrôlant les changements de forme des structures motrices spécialisées chez les animaux soient en fait les champs morphogénétiques, ils provoquent des mouvements plutôt que des changements nets de forme. C'est la raison pour laquelle il est préférable de les qualifier de champs moteurs. (Le mot « moteur » est utilisé ici en tant qu'adjectif du nom « mouvement »). Les champs moteurs, comme les champs morphogénétiques, dépendent de la résonance morphique de systèmes similaires précédents et participent à l'actualisation des formes virtuelles. Rien n'interdit de se référer aux canaux tendant vers une forme ou vers un état final comme à des chréodes dans le contexte des champs moteurs comme dans celui des champs morphogénétiques.

Les champs moteurs, ainsi que les champs morphogénétiques, sont organisés hiérarchiquement, et sont en général liés au développement, à la survie ou à la reproduction. Ces processus sont presque entièrement morphogénétiques chez les végétaux, alors que chez les animaux ils dépendent également du mouvement. En fait, chez la plupart des animaux la préservation des fonctions normales du corps implique elle-même un mouvement continu des organes internes tels que les intestins, le cœur, l'appareil respiratoire.

A l'encontre des végétaux, les animaux sont contraints de se nourrir d'autres organismes vivants afin de se développer et de préserver leurs formes. Les animaux partagent tous un champ moteur important : celui de l'alimentation. Ce dernier contrôle des champs subsidiaires responsables de la découverte, de la conservation et de l'ingestion des végétaux ou des animaux servant de nourriture. Certains animaux étant sédentaires obligent la nourriture à venir vers eux via l'eau ; d'autres se contentent de se déplacer jusqu'à ce qu'ils trou-

vent des végétaux leur convenant ; d'autres encore traquent et chassent d'autres animaux ; d'aucuns construisent des pièges pour capturer leurs proies ; certains sont des parasites ; d'autres des nécrophages, etc. Tous les modes d'alimentation se fondent sur des hiérarchies de chréodes spécifiques.

Un autre type fondamental de champ moteur concerne l'évitement des conditions défavorables. L'*Amœba* et le *Paramecium* affichent les types les plus simples de réaction : en faisant marche arrière et en s'éloignant d'un stimulus nocif puis en adoptant une autre direction. Des animaux sédentaires, tels que le *Stentor* et l'*Hydra*, réagissent à des stimuli moyennement défavorables en contractant leurs corps, mais en réponse à des stimuli plus sérieux, ils s'éloignent et s'installent ailleurs. En plus des réactions générales d'évitement, nombre d'animaux présentent aussi des types spéciaux de comportement qui les aident à échapper à leurs prédateurs ; par exemple, ils s'enfuient rapidement, ou demeurent sur leur territoire et effrayent d'une façon ou d'une autre le prédateur, ou ils « se figent » de manière à passer inaperçus.

Les champs de développement et de survie dans leur ensemble ont pour forme finale l'animal parfaitement développé dans des conditions optimales. L'animal n'a rien de particulier à faire quand cet état est atteint ; mais les déviations de cet état le placent sous l'influence de divers champs moteurs dirigés vers sa restauration. De telles déviations sont en fait fréquentes : le métabolisme continu de l'animal épuise ses réserves de nourriture ; des modifications de l'environnement l'exposent de façon imprévisible. Ces changements — et d'autres — sont détectés par les structures sensorielles et aboutissent à des modifications caractéristiques du système nerveux, qui devient alors la structure du germe de champs moteurs particuliers.

La forme finale du champ de reproduction dans son ensemble est l'établissement d'une progéniture viable. Chez les organismes unicellulaires et chez les animaux multicellulaires simples tels que l'*Hydra*, ceci est réalisé par un processus morphogénétique : les organismes se divisent en deux ou « bourgeonnent » en de nouveaux individus. De la même manière, des méthodes primitives de reproduction sexuée sont essentiellement morphogénétiques : nombre d'animaux inférieurs (tels que les oursins) ainsi que de végétaux inférieurs (tels que l'algue *Fucus*) libèrent simplement des millions d'ovules et de spermatozoïdes dans l'eau où ils vivent.

Chez les animaux plus évolués, les spermatozoïdes ne sont pas libé-

rés au hasard, mais à proximité de l'ovule, suite à un comportement reproducteur spécialisé. Ainsi le champ général de reproduction couvre-t-il les champs moteurs concernant la quête du partenaire, la cour et la copulation. Les organismes tombent parfois sous l'influence du premier champ moteur de la séquence, suite à des changements physiologiques internes transmis par les hormones aussi bien que par des stimuli olfactifs, visuels ou autres émanant de partenaires potentiels. Le point final du premier champ constitue le germe du second, etc. : à la recherche du partenaire succède la cour qui, en cas de succès, conduit au point de départ de la chréode de copulation. Dans les cas les plus simples, la forme finale de la séquence complète est chez le mâle l'éjaculation et chez la femelle, la ponte. De nombreux organismes aquatiques les libèrent simplement dans l'eau, alors que le dépôt des œufs des animaux terrestres implique souvent des modèles de comportement complexes et très spécifiques ; par exemple, les insectes Ichneumons injectent leurs œufs à des chenilles appartenant à une espèce précise, à l'intérieur desquelles leurs larves se développent de manière parasite, et les guêpes maçonnes réalisent des petites « amphores » dans lesquelles elles déposent une proie paralysée avant de pondre leurs œufs sur celle-ci puis de sceller les « amphores ».

Chez certaines espèces vivipares, le jeune est simplement mis au monde puis abandonné. Dispenser des soins après la naissance ou l'éclosion d'un jeune fait qu'un nouvel éventail de champs moteurs entre en jeu ; ceux-ci sont toujours placés sous le champ général de reproduction des parents mais ils servent en même temps le champ de reproduction et de survie de leur descendant. Le comportement des animaux revêt en conséquence une dimension sociale. Dans les cas les plus simples, les sociétés sont temporaires et se désintègrent lorsque la progéniture acquiert son indépendance ; dans d'autres, elles persistent et présentent une augmentation conséquente de la complexité du comportement. Des champs moteurs spéciaux contrôlent les différents types de communication entre les individus, et les tâches différenciées que différents individus accomplissent.

Dans les sociétés aussi complexes que celles des termites, des fourmis, des abeilles et des guêpes, des individus ayant des constitutions génétiques similaires ou identiques accomplissent des tâches tout à fait différentes et le même individu joue des rôles différents selon les moments : par exemple, chez les abeilles, une jeune ouvrière nettoiera la ruche, puis après quelques jours sera nourrice, puis elle

aidera à construire les rayons, elle recevra et emmagasinera ensuite le pollen, puis elle gardera la ruche et en fin de compte elle sortira pour participer à la récolte. (21) Chacun de ces rôles est couvert par un champ moteur de niveau supérieur, qui à son tour contrôle les chréodes de niveau inférieur impliquées dans les tâches particulières spécialisées. Des changements dans le système nerveux de l'insecte l'amènent sous l'influence de l'un ou l'autre de ces champs de niveau supérieur en le contraignant à entrer en résonance morphique avec des ouvrières précédentes ayant accompli ce travail particulier. De tels changements dépendant dans une certaine mesure d'altérations dans la physiologie de l'insecte qui vieillit, mais ils sont également influencés par des stimuli externes : les rôles des individus changent en réponse aux perturbations de la ruche ou de la société ; le système entier est soumis à la régulation.

Les champs moteurs de niveau supérieur concernant l'alimentation, la survie, la reproduction, etc., contrôlent en général une série de champs de niveau inférieur qui agissent en séquence, la forme finale de l'un fournissant la structure du germe du prochain. Des champs moteurs encore plus inférieurs dans la hiérarchie agissent souvent de manière cyclique pour donner des mouvements répétitifs, tels que ceux des jambes pour marcher, des ailes pour voler et des mâchoires pour mâcher. Les champs concernés par le contrôle précis de la contraction des cellules dans les muscles se trouvent au niveau le plus bas.

Les champs moteurs de niveau supérieur comprennent non seulement les organes sensoriels, le système nerveux et les muscles, mais encore des objets *extérieurs* à l'animal. Considérons par exemple le champ moteur de l'alimentation. Ce processus — la capture et l'ingestion de nourriture — est en fait un type spécial de morphogénèse par agrégation (cf. Section 4.1). L'animal affamé est la structure du germe et il entre en résonance morphique avec les formes finales précédentes de ce champ moteur, c'est-à-dire les animaux antérieurs similaires, y compris avec lui-même dans un bon état nutritionnel. Dans le cas d'un prédateur, l'acquisition de cette forme finale dépend de la capture et de l'ingestion de la proie. Le champ moteur de la capture se prolonge dans l'espace autour de l'animal, et inclut la forme virtuelle de la proie (cf Fig. 11). Cette forme virtuelle est achevée quand une entité correspondante suffisamment proche d'elle approche du prédateur : la proie est reconnue, et la chréode de capture induite. Sur un plan théorique, le champ moteur affecte des

événements probabilistes dans n'importe lequel des systèmes qu'il comprend, y compris les organes sensoriels, les muscles, la proie. Mais dans la plupart des cas, son influence semble susceptible de ne concerner que la modification d'événements probabilistes dans le système nerveux central, en dirigeant les mouvements de l'animal vers l'actualisation de la forme finale, dans le cas de la capture de la proie.

9.7. Les champs moteurs et les sens

Par résonance morphique, un animal tombe sous l'influence de champs moteurs spécifiques en tant que résultat de sa structure caractéristique et des modèles internes d'activité oscillatoire. Ces modèles sont modifiés par des changements intervenant dans le corps de l'animal et par les influences environnementales.

Les mêmes champs moteurs entreront en jeu lorsque différents stimuli entraîneront les mêmes changements dans le corps de l'animal. C'est ce qui semble se produire dans les organismes unicellulaires qui présentent les mêmes réactions d'évitement à une large variété de stimuli physique et chimique : il est probable qu'ils ont tous des effets similaires sur l'état physico-chimique de la cellule, par exemple en modifiant la perméabilité de la membrane cellulaire au calcium ou aux autres ions.

Chez les animaux multicellulaires simples, disposant d'une spécialisation sensorielle insignifiante, l'éventail des réactions aux stimuli n'est guère supérieur à celui des organismes unicellulaires. L'*Hydra* par exemple présente les mêmes réactions d'évitement à des stimuli physiques et chimiques aussi différents que nombreux, et répond à des objets tels que les particules de nourriture uniquement suite à des contacts mécaniques. Cependant, comme chez certains organismes unicellulaires, sa réponse aux objets solides est modifiée par des stimuli chimiques. Une expérience simple permet de démontrer ce point : si on accroche de petits morceaux de papier filtre aux tentacules d'une *Hydra* affamée, aucune réaction n'intervient, mais l'animal se sert de ses tentacules pour les porter vers sa bouche et les avaler s'ils ont été au préalable imprégnés de jus de viande. (22)

En revanche, les animaux possédant des yeux où les images se forment perçoivent des objets situés à une certaine distance. Les champs moteurs se prolongent en conséquence beaucoup plus loin à l'extérieur de l'environnement ; l'éventail et l'étendue du comportement

des animaux s'en trouvent très accrus. De la même manière, le sens de l'ouïe permet de déceler des objets distants et autorise donc une extension de l'étendue spatiale des champs moteurs même dans les zones invisibles. Chez certains animaux, en particulier chez les chauves-souris, ce sens a remplacé la vue en tant que fondement de champs moteurs agrandis. Et chez certaines espèces aquatiques, telles que les poissons électriques appartenant aux Mormyridés et aux Gymnotidés, des récepteurs spécialisés détectent les changements dans le champ électrique autour d'eux par des pulsations de leurs organes électriques ; ce sens leur permet de localiser des proies et d'autres objets dans les rivières tropicales boueuses dans lesquelles ils vivent.

Lors du déplacement des animaux, les stimuli sensoriels émanant tant d'eux-mêmes que de leur environnement changent du fait même de leurs propres mouvements. Ce feedback continu joue un rôle essentiel dans la coordination des mouvements par leurs champs moteurs.

Les champs moteurs, ainsi que les champs morphogénétiques, sont des structures de probabilité qui s'associent par résonance morphique aux systèmes physiques sur la base de leurs modèles d'oscillation tridimensionnels. Il est donc d'une importance fondamentale que toutes les impulsions sensorielles soient traduites dans des modèles d'activité spatio-temporelle à l'intérieur du système nerveux. En ce qui concerne le sens du toucher, les stimuli agissent sur des parties spécifiques du corps, qui à travers des voies nerveuses particulières sont « répertoriées » dans le cerveau ; en ce qui concerne la vue, les images se formant sur la rétine déterminent des changements modélés spatialement dans les nerfs optiques et le cortex visuel ; et en dépit du fait que les stimuli olfactifs, gustatifs et audidifs ne soient pas directement spatiaux, les nerfs qu'ils excitent via les organes sensoriels correspondants ont des situations spécifiques, et les impulsions se propageant le long de ces nerfs jusqu'au système nerveux central établissent des modèles d'excitation caractéristiques.

Il en résulte que des stimuli particuliers et des combinaisons de stimuli ont des effets spatio-temporels caractéristiques. Ces modèles d'activité dynamique mettent le système nerveux en résonance morphique avec des systèmes nerveux passés et similaires en des états similaires, et donc sous l'influence de champs moteurs particuliers.

9.8. Régulation et régénération

Les champs moteurs, ainsi que les champs morphogénétiques, conduisent les systèmes placés sous leur influence vers des formes finales caractéristiques. Ils y parviennent en principe en induisant une série de mouvements dans une séquence définie. Les stades intermédiaires sont stabilisés par résonance morphique ; en d'autres termes, il s'agit de chréodes. Mais les chréodes ne représentent que les voies les plus probables vers les formes finales. Si la voie normale est bloquée ou si le système en est détourné pour toute autre raison, la même forme finale sera atteinte de façon différente : le système est soumis à la régulation (Section 4.1). De nombreux systèmes morphogénétiques, mais pas tous, sont capables de réguler : il en va de même pour les systèmes moteurs.

La régulation se produit sous l'influence de champs moteurs à tous les niveaux de la hiérarchie : par exemple si certains muscles ou certains nerfs de la patte d'un chien sont endommagés, le modèle de contraction dans les autres muscles s'ajuste afin que le membre fonctionne normalement. Si la patte est amputée, les mouvements des membres restants changent afin que l'animal conserve la faculté de marcher, même en boitant. Si des parties du cortex cérébral sont touchées, l'animal s'en remet plus ou moins complètement après quelque temps. S'il est aveugle, sa faculté de se déplacer s'améliorera progressivement plus il se fiera à ses autres organes sensoriels. Et si son itinéraire habituel vers son foyer, sa nourriture ou sa progéniture est bloqué, il changera la séquence de ses mouvements jusqu'à ce qu'il découvre une nouvelle façon d'atteindre son objectif.

L'équivalent en comportement de la régénération se produit quand la forme finale d'une chréode a été réalisée mais qu'elle est ensuite interrompue : pensez par exemple à un chat ayant attrapé une souris, le point final de la chréode de la capture. Si la souris s'échappe de ses griffes, les mouvements du chat seront alors dirigés afin de la recapturer.

En dehors de tous les exemples de « régénération comportementale », l'homologie avec la régénération morphogénétique est montrée de manière plus évidente dans le « comportement morphogénétique », concerné par la fabrication de structures caractéristiques. Dans certains cas, des animaux rétablissent ces structures après qu'elles ont été endommagées. On a observé par exemple que des guêpes maçonnes remplissaient les trous faits par le chercheur dans

les parois de leurs amphores quelquefois au moyen d'actions qui ne sont jamais accomplies en temps normal. (23) Et la coopération et la coordination permettent aux termites de réparer leurs galeries et leurs nids. (24)

De telles activités ont parfois été interprétées comme une preuve d'intelligence, en se fondant sur le fait que des animaux mus par un comportement instinctif et rigide seraient incapables de réagir de manière si souple à des situations inhabituelles. (25) Le même raisonnement permettrait d'affirmer que la régulation des embryons d'oursins et que la régénération des vers attestent de leur intelligence. Cette extension de la terminologie psychologique serait cependant plus confuse qu'utile. Selon l'hypothèse de la causalité formative, les similitudes pourraient être reconnues mais interprétées d'une manière opposée. Les facultés des animaux à atteindre des objectifs comportementaux de manière inhabituelle ne soulèvent pas de principes fondamentalement nouveaux quand on les considère par rapport à la régulation et à la régénération morphogénétiques. Et quand chez les animaux supérieurs, certains types de comportement ne suivent plus les chréodes standards — quand la régulation du comportement devient en quelque sorte la règle plutôt que l'exception — cette souplesse peut être envisagée comme une extension des possibilités inhérentes des champs morphogénétiques et des champs moteurs de par leur nature même.

NOTES

(1) Voir Darwin (1880) pour le récit classique.

(2) Darwin (1882).

(3) Audus (1979).

(4) Curry (1968).

(5) Jaffé (1973).

(6) Siegelman (1968).

(7) Bünning (1973).

(8) Satter (1979).

(9) Bose (1926) ; Roblin (1979).

(10) Bentrup (1979).

(11) Plusieurs espèces d'*Amœba* diffèrent en détail dans leurs modèles de mouvement et de réaction du type très connu *A. proteus* ; l'*A. limax* forme peu de pseudopodes et se déplace vers l'avant comme une masse unique élongée ; l'*A. verrucosa* se déplace lentement et sa forme est presque constante ; l'*A. velata* envoie dans l'eau un pseudopode ressemblant à une

antenne. Néanmoins les principes généraux de mouvements semblent être les mêmes. Pour de plus amples détails et références, voir Jennings (1906).

(12) F.D. Warner in Roberts et Hyams (éditeurs) (1979).

(13) Sleight (1968).

(14) Jennings (1906).

(15) Eckert (1972).

(16) E.g. Pecher (1939).

(17) Verveen et de Felice (1974).

(18) Katz et Miledi (1970).

(19) Stevens (1977).

(20) Katz (1966).

(21) Lindauer (1961).

(22) Jennings (1906).

(23) Hingston (1928).

(24) Marais (1971) ; von Frisch (1975).

(25) Hingston (1928).

CHAPITRE 10

INSTINCT ET APPRENTISSAGE

10.1. L'influence des actions passées

Les champs moteurs, comme les champs morphogénétiques, proviennent de la résonance morphique de systèmes similaires précédents. La structure détaillée d'un animal et les modèles d'activité oscillatoire au sein de son système nerveux *lui* ressemblent en général plus qu'à tout autre animal. Ainsi la résonance morphique la plus spécifique agissant sur lui sera celle de son propre passé (cf section 6.5). Vient ensuite la résonance morphique d'animaux semblables sur le plan génétique qui vivaient dans le même environnement. La moins spécifique est celle d'animaux d'autres races vivant dans des environnements différents. Dans le modèle de la vallée de la chréode (Fig. 5), cette dernière stabilisera l'aspect général de la vallée, tandis que la résonance morphique plus spécifique déterminera la topologie détaillée du fond de la vallée.

Les « contours » de la vallée de la chréode dépendent du degré de similitude entre le comportement d'animaux semblables de la même race ou espèce. La résonance morphique engendrerait des chréodes étroites et profondes représentées par des vallées aux parois escarpées (Fig. 27 A), si leurs modèles de mouvement présentaient peu de variation. Il en résulterait un effet puissamment canalisateur sur le comportement des individus subséquents, lesquels tendraient donc à se conduire de manière très similaire. Les modèles stéréotypés de mouvement déterminés par de telles chréodes apparaissent à des

niveaux inférieurs comme des réflexes et à des niveaux supérieurs comme des instincts.

En revanche, si des animaux semblables atteignaient les formes finales de leurs champs moteurs par différents modèles de mouvement, les chréodes ne seraient pas aussi précises (Fig. 27 B) ; il y aurait donc une plus grande place pour les différences individuelles dans le comportement. Mais une fois qu'un animal particulier a atteint l'objectif comportemental à sa façon, son comportement ultérieur tendra à être canalisé de la même façon par la résonance morphique de ses propres états antérieurs ; et plus ces actions seront répétées, plus cette canalisation deviendra puissante. Des chréodes individuelles aussi caractéristiques deviennent des habitudes.

Du point de vue de l'hypothèse de la causalité formative, il n'existe qu'une différence de degré entre les instincts et les habitudes : tous deux dépendent de la résonance morphique, les premiers de celle d'innombrables individus précédents de la même espèce et les seconds de celle d'états antérieurs du même individu.

Ceci ne signifie pas que les réflexes et que les instincts ne dépendent pas d'une morphogenèse du système nerveux structurée d'une manière très spécifique. Ils en dépendent évidemment. Ceci ne signifie pas non plus que durant des processus d'apprentissage aucun changement, qu'il soit physique ou chimique, n'intervienne dans le système nerveux pour faciliter la répétition d'un modèle de mouvement. Il se pourrait que dans des systèmes nerveux simples exécutant

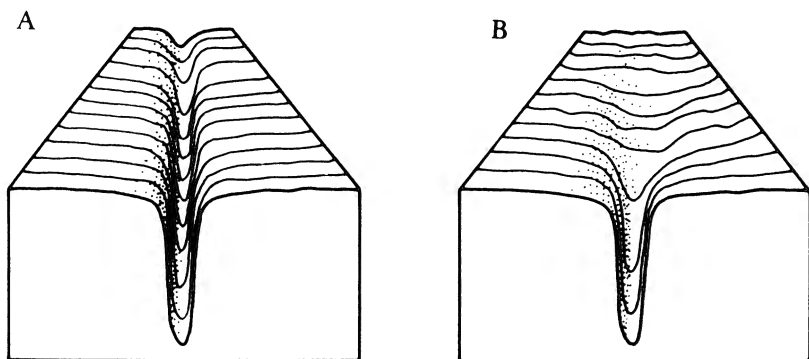


FIGURE N° 27. Représentation graphique d'une chréode profondément canalisée (A) et d'une chréode faiblement canalisée aux stades initiaux (B).

des fonctions stéréotypées le potentiel pour de tels changements puisse être déjà « préfabriqué » dans les « trames » de telle façon que l'apprentissage se produise de manière quasi-mécanique. On a ainsi découvert que chez le mollusque *Aplysia* la structure du système nerveux était presque identique chez différents individus jusque dans les plus petits détails de la position des synapses excitatrices et inhibitrices sur des cellules particulières. Des types très simples d'apprentissage se produisent en connexion avec le retrait réflexe des branchies dans la cavité du manteau, c'est-à-dire l'accoutumance à des stimuli inoffensifs, et la sensibilisation à ceux qui sont nuisibles ; ce faisant, les activités de synapses excitatrices et inhibitrices particulières agissant sur les cellules nerveuses individuelles se modifient de manière précise. (1) La simple description de ces processus ne révèle pas en elle-même les raisons de ces modifications ; celles-ci sont objet de conjectures. Une suggestion veut que les modifications soient chimiques et qu'elles impliquent éventuellement des changements dans la phosphorylation des protéines. (2) Mais comment cette spécialisation de structure et de fonction dans les nerfs et dans les synapses s'établit-elle en premier lieu ? Cette question relève également de la morphogenèse.

Les systèmes nerveux des animaux supérieurs varient beaucoup plus d'un individu à un autre et sont beaucoup plus compliqués que ceux des invertébrés tels que l'*Aplysia*. Nos connaissances quant à la façon dont des modèles de comportement appris sont retenus (3) sont limitées, mais elles sont suffisantes pour que nous sachions qu'il n'existe aucune explication simple en termes de « traces » physiques ou chimiques spécifiquement localisées dans le tissu nerveux.

Nombre de recherches ont montré que chez les mammifères, des habitudes apprises persistent souvent après des dommages sérieux au cortex cérébral ou aux régions sub-corticales du cerveau. En outre, quand une perte de mémoire intervient, elle n'est pas en relation étroite avec la situation des lésions mais plutôt avec la quantité totale de tissus détruits. K.S. Lashley résume ainsi les résultats de centaines d'expériences :

« Il est impossible de démontrer la situation isolée d'une trace de mémoire quelque part dans le système nerveux. Des régions limitées peuvent être essentielles à l'apprentissage ou à la faculté de retenir une activité particulière, mais les parties sont équivalentes sur le plan fonctionnel en de telles régions ». (4)

Un phénomène semblable a été mis en évidence chez un invertébré, le poulpe-pieuvre : des observations quant à la persistance des habitudes apprises après la destruction de diverses parties du lobe vertical du cerveau ont conduit à la conclusion apparemment paradoxale que « la mémoire est à la fois partout et nulle part en particulier ». (5)

Ces découvertes sont extrêmement surprenantes d'un point de vue mécaniste. Dans une tentative pour les expliquer, d'aucuns ont suggéré que des « traces » de mémoire étaient en quelque sorte réparties dans le cerveau d'une manière analogue au stockage de l'information sous la forme d'interférences comme dans un hologramme. (6) Mais il ne s'agit que d'une vague spéculation.

L'hypothèse de la causalité formative fournit une autre interprétation, à la lumière de laquelle la persistance d'habitudes apprises en dépit de dommages au cerveau est moins surprenante : les habitudes dépendent des champs moteurs, lesquels ne sont en aucune façon conservés dans le cerveau, mais directement issus de ses états antérieurs par résonance morphique.

Certaines implications de l'hypothèse de la causalité formative quant à l'instinct et à l'apprentissage sont étudiées dans les sections suivantes, et au chapitre 11, des moyens sont suggérés pour distinguer par l'expérience les prévisions déduites de cette hypothèse de celles de la théorie mécaniste.

10.2. L'instinct

Certains modèles d'activité motrice sont innés plutôt qu'appris chez tous les animaux. Les plus fondamentaux sont ceux des organes internes, tels que le cœur et les intestins, mais de nombreux modèles de mouvement des membres, des ailes et des autres structures motrices sont également innés. Ceci constitue un fait évident chez les animaux capables de se mouvoir correctement très peu de temps après leur naissance ou leur éclosion.

Distinguer entre un comportement inné et un comportement appris n'est pas toujours facile. Le comportement caractéristique qui se développe chez de jeunes animaux élevés de manière isolée peut en général être considéré comme inné. Cependant, le comportement qui n'apparaît que lorsqu'ils sont en contact avec d'autres membres de leur espèce peut également être inné, mais requiert pour son expression les stimuli d'autres animaux.

Des études du comportement instinctif d'un grand nombre d'ani-

maux ont mené à diverses conclusions générales, lesquelles constituent les concepts classiques de l'éthologie. (7) Elles peuvent être résumées ainsi :

1° — Les instincts sont organisés dans une hiérarchie de « systèmes » ou « centres » superposés les uns les autres. Chaque niveau est tout d'abord activé par un système se situant à un niveau supérieur. Un certain nombre de facteurs incluant des hormones, des stimuli sensoriels émanant des viscères de l'animal, et de stimuli environnementaux sont susceptibles d'influencer le centre le plus élevé de chaque instinct majeur.

2° — Le comportement qui intervient sous l'influence des instincts majeurs consiste souvent en des chaînes de modèles de comportement plus ou moins stéréotypés dites *modèles d'action fixe*. Quand un tel modèle d'action fixe constitue le point final d'une chaîne de comportement instinctif majeure ou mineure, on le nomme *acte de consommation*. Le comportement durant la première partie d'une chaîne de comportement instinctive, par exemple la quête de la nourriture, peut être plus souple et est habituellement dit *comportement appétissant*.

3° — Chaque système exige un stimulus spécifique afin d'être activé ou *déclenché*. Le stimulus ou le déclencheur provient soit du corps de l'animal soit de l'environnement. Dans ce dernier cas, on s'y réfère souvent comme à un *stimulus signe*. On présume qu'un déclencheur donné ou stimulus signe agit sur un mécanisme pseudo-sensoriel spécifique appelé le *mécanisme déclencheur inné*, lequel induit la réaction.

Ces concepts sont en accord avec les idées concernant les champs moteurs développées dans le chapitre précédent. Les modèles d'action fixe peuvent être compris en termes de chréodes et les mécanismes déclencheurs innés comme des structures germinales des champs moteurs appropriés.

10.3. Les stimuli signes

Les réponses instinctives des animaux aux stimuli signes prouvent que ces derniers font abstraction de certains traits spécifiques et répétitifs de leurs environnements

« Un animal ne répond « aveuglément » qu'à une partie de la situation expérimentale et néglige les autres, bien que ses orga-

nes sensoriels soient tout à fait capables de les capter... On met facilement en évidence ces stimuli en testant la réaction à diverses situations différant les unes des autres par rapport à l'un ou l'autre stimuli. En outre, même quand un organe sensoriel est impliqué dans le déclenchement d'une réaction, seule une partie des stimuli qu'il est susceptible de capter est vraiment efficace. En règle générale, une réaction instinctive ne répond qu'à un très petit nombre de stimuli, et la plus grande partie de l'environnement n'a que peu, voire aucune influence, et cela en dépit du fait que l'animal possède parfois l'équipement sensoriel nécessaire à la réception de nombreux détails » (N. Tinbergen) (8).

Les exemples suivants (9) illustrent ces principes :

La réaction agressive de l'épinoche mâle durant la saison des amours à l'encontre des autres mâles est principalement déclenchée par le stimulus signe du ventre rouge : des reproductions ayant des formes très grossières et des ventres rouges font l'objet de plus d'attaques que celles ayant la forme correcte mais aucune coloration rouge. Des résultats semblables ont été obtenus dans des expériences réalisées avec des rouge-gorges : un mâle menace sur son territoire des reproductions très approximatives ne présentant que des poitrails rouges, voire seulement quelques plumes de cette couleur, mais réagit de manière moins véhémence à des spécimens plus fidèles mais ne présentant pas un plumage rouge au niveau de la gorge.

Les jeunes canards et les jeunes oies réagissent instinctivement à l'approche des oiseaux de proie, en fonction de la forme de l'oiseau en vol. Des études réalisées avec des modèles en carton ont montré que la caractéristique déterminante était un cou court — particularité des faucons et des oiseaux prédateurs — tandis que la taille et la forme des ailes et de la queue n'avaient que peu d'importance.

Chez certains lépidoptères, l'odeur sexuelle ou phéromone normalement produite par les femelles contraint les mâles à tenter de copuler avec tout objet la dégageant.

Chez les sauterelles appartenant à l'espèce *Ephippiger ephippiger*, le chant des mâles attire les femelles désireuses de s'accoupler. Cette attraction s'exerce sur des distances considérables alors que les femelles ignorent les mâles silencieux même s'ils sont très proches d'elles. Les mâles qui sont réduits au silence parce qu'on leur a englué les ailes sont incapables d'attirer les femelles.

Les coqs se portent à la rescousse des poules en réponse à leurs cris de détresse, mais ils ne le font pas s'ils les voient en détresse, par exemple à travers une vitre insonorisée.

Selon l'hypothèse de la causalité formative, la reconnaissance de ces stimuli signes dépendrait de la résonance morphique d'animaux semblables précédents exposés à des stimuli similaires. En raison du processus d'ajustement automatisé à la moyenne, cette résonance ne soulignera que les traits communs des modèles spatio-temporels d'activité déterminés par ces stimuli dans le système nerveux. Il en résultera que seuls certains stimuli spécifiques émanant de l'environnement seront captés alors que d'autres seront ignorés. Considérons par exemple les stimuli agissant sur les coqs dont les poules sont en danger. Imaginons une collection de photographies de poulets en détresse en différentes occasions. Celles ayant été prises de nuit ne montreront rien ; celles ayant été prises à la lumière du jour représenteront des poulets de tailles et de formes diverses vus de face, de dos, de profil ou d'au-dessus ; en outre, ils se trouveront parfois près d'autres objets de toute taille et de toute forme, ou même dissimulés derrière ceux-ci. Si les négatifs de toutes ces photographies sont superposés pour produire une image composée, aucun trait quel qu'il soit ne sera renforcé : il n'en résultera qu'une simple tache. En revanche, imaginons une série d'enregistrements réalisée au moment même où les photographies ont été prises. Toutes portent l'enregistrement des cris de détresse, et si ces sons sont superposés, ils se renforcent les uns les autres pour donner un cri de détresse automatiquement équilibré. Cette superposition de photographies et d'enregistrements est analogue aux effets de la résonance morphique des systèmes nerveux des coqs précédents sur un coq ultérieur exposé aux stimuli émis par une poule en danger : les stimuli visuels ne résultent pas en une résonance morphique spécifique et n'évoquent aucune réaction instinctive, quelle que soit la pitié que puisse ressentir un observateur humain, alors qu'il en va tout autrement des stimuli auditifs.

Cet exemple sert à illustrer ce qui semble être un principe général : les formes sont souvent inefficaces en tant que stimuli signes. Ceci est sans doute dû au fait qu'elles sont très variables parce qu'elles dépendent de l'angle de vision de l'observateur. En revanche, les couleurs en sont moins dépendantes, et les sons et les odeurs jouent des rôles importants en tant que déclencheurs de réactions instinctives ; et dans les cas où les formes sont efficaces, il existe une certaines cons-

tance de l'angle de vision. Par exemple, les oisillons au sol voient la silhouette des prédateurs qui les survolent, et ils répondent donc à de telles formes. Et quand les formes où les modèles servent en tant que stimuli signes sexuels, cela se traduit lors des exhibitions amoureuses ou nuptiales au cours desquelles les animaux adoptent des attitudes et des postures bien définies à l'égard de leurs partenaires potentiels. Ceci vaut également pour les démonstrations de soumission et d'agression.

10.4. L'apprentissage

L'apprentissage intervient lorsqu'un changement adaptatif relativement permanent se manifeste dans le comportement suite à une expérience passée. On distingue quatre catégories générales : (10)

1) Le type le plus universel, rencontré y compris chez les organismes unicellulaires, (11) est l'accoutumance, laquelle peut être définie comme étant le déclin d'une réponse suite à une stimulation répétée n'ayant provoqué aucun phénomène de renforcement. Un exemple commun est l'affaiblissement des réactions d'alarme et d'évitement aux nouveaux stimuli qui s'avèrent être inoffensifs : les animaux s'y habituent.

Ce phénomène implique l'existence d'un type quelconque de mémoire, qui permet de reconnaître les stimuli récurrents. Selon l'hypothèse de la causalité formative, cette reconnaissance est due en premier lieu à la résonance morphique de l'organisme avec ses états passés, y compris ceux déterminés par de nouveaux stimuli sensoriels. Cette résonance sert à préserver, et en fait à définir, l'identité de l'organisme avec lui-même dans le passé (Section 6.5). Les stimuli répétés émanant de l'environnement dont les réactions ne sont pas renforcées deviendront parties intégrantes du propre « arrière-plan » de l'organisme. A l'inverse, toute nouvelle caractéristique de l'environnement émergera parce qu'elle n'est pas reconnue : l'animal répondra en général par l'évitement ou par l'alarme précisément parce que le stimuli est étranger.

Dans le cas de certaines réactions stéréotypées, telles que le retrait réflexe branchial chez le mollusque *Aplysia*, l'accoutumance se produit d'une manière quasi-mécanique sur la base de spécialisations structurales et biochimiques préexistantes dans le système nerveux (Section 10.1). Mais dans ce cas, cette spécialisation est secondaire, et semble susceptible d'avoir évolué à partir d'une situation dans

laquelle l'accoutumance dépend plus directement de la résonance morphique.

2) Des modèles innés d'activité motrice apparaissent lors de la croissance des individus chez tous les animaux. Certains sont parfaits dès leur première apparition alors que d'autres s'améliorent au fil du temps. Les premières tentatives d'un oisillon pour voler ou les premières tentatives d'un mammifère pour marcher ne sont parfois que des succès partiels, mais elles s'améliorent ensuite. Toutes ces améliorations ne sont pas dues à la pratique : il s'agit dans certains cas d'une simple question de maturité qui intervient d'une même manière progressive chez l'animal ayant été immobilisé. (12) Néanmoins, il existe nombre de types de compétence motrice dont l'amélioration n'est pas imputable à la maturité.

Du point de vue de l'hypothèse de la causalité formative, ce type d'apprentissage peut être interprété en termes de régulation du comportement. La chréode moyenne, tirée automatiquement de la résonance morphique d'innombrables individus précédents de la même espèce régit les premières tentatives d'un animal pour exécuter un modèle particulier et inné de mouvement. Cette chréode standard n'engendre parfois que des résultats approximativement satisfaisants, par exemple en raison de déviations de la norme dans les organes sensoriels, le système nerveux ou les structures motrices des animaux. Lors de l'exécution des mouvements, la régulation engendre spontanément des « ajustements subtils » de la chréode d'ensemble et des chréodes de niveaux inférieurs sous son contrôle. Ces chréodes « ajustées » seront stabilisées par résonance morphique avec les propres états précédents de l'animal lorsque le modèle de comportement sera répété.

3) Il arrive que des animaux répondent à un stimulus par une réaction qui est normalement suggérée par un stimulus différent. Ce type d'apprentissage se produit quand le nouveau stimulus est appliqué en même temps, ou immédiatement avant, l'original. Les « réflexes conditionnés » découverts par I.P. Pavlov chez les chiens constituent des exemples classiques. Les chiens salivent quand on leur présente de la nourriture. On fit donc sonner une cloche à plusieurs reprises en leur présentant leur nourriture. Ils commencèrent après quelque temps à saliver en entendant la cloche, même en l'absence de nourriture.

Un exemple extrême de ce type d'apprentissage se produit dans l'imprégnation des jeunes oiseaux, en particulier les canetons et les

oisons. Peu de temps après l'éclosion, ils réagissent instinctivement à tout objet en mouvement raisonnablement grand en le suivant. En principe, il s'agit de leur mère, mais ils suivent également des « nourrices », des êtres humains, voire des objets inanimés qu'on tire devant eux. Après un laps de temps relativement court, ils reconnaissent les caractéristiques générales de l'objet en mouvement, et plus tard ses caractéristiques spécifiques. A ce stade, seuls l'oiseau, la personne ou l'objet particuliers associés, par lequel ils ont été imprégnés, déclenchera cette réaction.

D'une manière analogue, des animaux apprennent souvent à reconnaître les caractéristiques particulières de leurs conjoints ou de leurs jeunes par la vue, l'ouïe, l'odorat et le toucher. Développer cette reconnaissance prend du temps : ainsi un couple de foulques ayant des jeunes récemment éclos nourrira et même adoptera des poussins étrangers ressemblant aux leurs, mais lorsque ceux-ci auront environ deux semaines, les parents feront la différence et ne toléreront plus aucun étranger, quelle que soit la ressemblance. (15)

Un processus comparable est sans aucun doute responsable de la reconnaissance d'endroits particuliers, tels que les sites des nids, grâce à des repères et à d'autres caractéristiques qui leur sont associés. Ce type d'apprentissage semble en fait susceptible de jouer un rôle important dans le développement de la reconnaissance visuelle en général. Les stimuli d'un objet différant selon l'angle de vision, l'animal doit apprendre qu'ils sont tous en relation avec celui-ci. De la même façon, les associations entre différentes sortes de stimuli sensoriels émanant du même objet — visuel, auditif, gustatif, tactile — doivent en général être apprises.

Lorsque le nouveau stimulus et le stimulus original se produisent de manière simultanée il semble, à première vue que les différents modèles de changement physico-chimique qu'ils provoquent dans le cerveau se lient de manière progressive, suite à une répétition fréquente. Mais cette interprétation apparemment simple dissimule deux difficultés. Premièrement, le nouveau stimulus ne se produit pas simultanément à l'original, mais le précède. Il est nécessaire de supposer dans ce cas que l'influence du stimulus persiste pendant quelque temps de sorte qu'il est encore présent quand le stimulus habituel se produit. Il est aisé de concevoir cette sorte de mémoire par analogie avec un écho qui s'évanouit de manière progressive. L'existence d'une telle mémoire à court terme a en fait été démontrée de manière empirique (14) ; il est concevable de l'expliquer en termes

de circuits réverbérants d'activité électrique dans le cerveau. (15) Deuxièmement, l'apprentissage associatif semble impliquer des discontinuités définies : il intervient par stades. Il se peut qu'il en soit ainsi parce que le lien entre le stimulus nouveau et l'original implique l'établissement d'un nouveau champ moteur ; le champ responsable de la réaction originale devra d'une façon ou d'une autre être élargi pour incorporer le nouveau stimulus. En fait, une *synthèse* se produit au cours de laquelle une nouvelle unité motrice apparaît. Et une nouvelle unité n'émerge pas progressivement, mais seulement grâce à un soudain « saut quantique » (ou grâce à plusieurs « sauts » successifs).

4) Les animaux apprennent à répondre à un stimulus particulier *après* l'avoir perçu, ils peuvent également apprendre à se comporter de telle manière qu'ils atteignent un objectif en tant que *résultat* de leurs activités. Selon le langage de l'école behavioriste, dans ce « conditionnement », la réponse « émise » par l'animal précède le stimulus de renforcement. Les rats dans les « cages de Skinner » nous fournissent des exemples classiques. Ces cages contiennent un levier, qui lorsqu'il est abaissé, libère une boulette de nourriture. Après des expériences répétées, les rats apprennent à associer la manœuvre du levier à la récompense. De la même manière, ils apprennent à presser un levier pour éviter le stimulus douloureux d'un choc électrique.

L'association d'un modèle particulier de mouvement à une récompense et à l'évitement d'une punition semble habituellement se manifester suite à une erreur ou à une épreuve. Mais l'intelligence d'un ordre supérieur a été démontrée, chez les primates, en particulier chez les chimpanzés. Des expériences fameuses, conduites il y a plus de cinquante ans, amenèrent W. Höhler à découvrir que ces singes étaient capables de résoudre des problèmes avec « perspicacité » (16). Ainsi des chimpanzés étaient-ils placés dans une pièce aux murs très hauts, impossibles à escalader, et au plafond de laquelle pendait hors de leur portée un régime de bananes mûres. Après un certain nombre de tentatives pour attraper les fruits en se tenant sur leurs antérieurs et en sautant, ils abandonnèrent cette approche. Un des singes s'intéressa alors à l'une des nombreuses caisses en bois qui avaient été placées dans la pièce au début de l'expérience, puis aux bananes. Il tira alors la caisse au-dessous des fruits et y grimpa. Cela ne suffisant pas, il alla chercher une autre caisse et la déposa sur la

première. La hauteur ne convenant toujours pas, il en ajouta une troisième, grimpa et saisit les fruits.

Maints autres exemples de comportement perspicace ont été mis en évidence par des chercheurs : au cours d'une expérience, des chimpanzés ont ainsi appris à utiliser des bâtons pour ramener vers eux la nourriture placée à l'extérieur des cages et hors de leur portée. Ils le faisaient d'autant plus vite qu'on les avait autorisés à jouer avec des bâtons plusieurs jours auparavant ; ils en étaient venus à les utiliser comme des extensions fonctionnelles de leurs bras durant cette période. L'utilisation des bâtons pour ramener vers eux de la nourriture représentait donc « l'intégration de composants moteurs acquis au cours d'une expérience précédente en des modèles de comportements nouveaux et appropriés. » (17)

Tant dans l'apprentissage résultant des efforts et des erreurs que dans l'apprentissage perspicace, des chréodes existantes sont intégrées en de nouveaux champs moteurs de niveau supérieur. Ces synthèses ne peuvent résulter que de « sauts » soudains. Si les nouveaux modèles de comportement rencontrent le succès, ils tendront à être répétés. Les nouveaux champs moteurs seront donc stabilisés par résonance morphique lorsque le comportement appris deviendra habituel.

10.5. Tendances innées à apprendre

L'originalité de l'apprentissage est parfois absolue : il est possible qu'un nouveau champ moteur apparaisse non seulement pour la première fois dans l'histoire d'un individu mais encore pour la première fois purement et simplement. D'un autre côté, un animal peut apprendre quelque chose que les membres de son espèce ont déjà appris par le passé. Dans ce cas, l'émergence du champ moteur approprié sera facilitée par la résonance morphique des animaux semblables précédents. Si un champ moteur devient de mieux en mieux établi via la répétition chez de nombreux individus, l'apprentissage est susceptible de devenir de plus en plus facile : il y aura une puissante disposition innée concernant l'acquisition de ce modèle particulier de comportement.

Un comportement appris, répété souvent, tendra donc à devenir semi-instinctif. Par un processus inverse, un comportement instinctif deviendra semi-appris. Ce dernier type d'intégration entre un comportement instinctif et un comportement appris est illustré de

manière très claire par les chants des oiseaux. (18) Chez certaines espèces, telles que la palombe et le coucou, le modèle du chant est pratiquement inné et varie donc peu d'un oiseau à un autre. Mais chez d'autres, tels que le pinson, le chant possède une structure générale caractéristique de l'espèce tandis qu'il diffère dans ses moindres détails d'un individu à un autre ; les autres oiseaux reconnaissent ces différences qui jouent un rôle important au niveau du couple. Des oiseaux élevés de manière isolée produisent des versions simplifiées et dépourvues de caractère du chant de leur espèce, montrant ainsi que c'est la structure générale qui est innée. Cependant en des conditions normales, ils développent et améliorent leur chant en imitant leurs congénères. Ce processus est encore plus évident chez les oiseaux moqueurs qui empruntent des éléments de chants appartenant à d'autres espèces que la leur. Et certains types d'oiseaux, en particulier les perroquets et les mainates, dans les conditions artificielles de leur captivité vont jusqu'à imiter leurs parents adoptifs humains.

Chez les espèces dont les chants sont presque totalement innés, le manque de variation individuelle est à la fois un effet et une cause des chréodes motrices bien définies et hautement stabilisées (cf Fig. 27 A) ; plus le même modèle de mouvement sera répété, plus grande sera sa tendance à être répété ultérieurement. Mais chez des espèces présentant des différences individuelles du chant, la résonance morphique engendrera des chréodes moins bien définies (cf Fig. 27 B) : la structure générale de la chréode sera déterminée par le processus d'ajustement automatique à la moyenne, alors que les détails dépendront de l'individu. Le modèle de mouvements qu'il exécute lorsqu'il chante pour la première fois influencera son chant subséquent, eu égard à la spécificité de la résonance morphique de ses états passés ; avec la répétition, son modèle caractéristique de chant deviendra habituel lorsque ses chréodes individuelles seront approfondies et stabilisées.

NOTES

(1) Kandel (1979).

(2) Ibid.

(3) H.A. Buchtel et G. Berlucchi *in* Duncan et Weston-Smith (1977).

(4) Lashley (1950).

- (5) Boycott (1965).
- (6) Pribram (1971).
- (7) Cf Thorpe (1963) pour une discussion en profondeur.
- (8) Tinbergen (1951).
- (9) Ibid.
- (10) Thorpe (1963).
- (11) E.G. Jennings (1906)
- (12) Hinde (1966).
- (13) Thorpe (1963).
- (14) Spear (1978).
- (15) La preuve expérimentale n'a jamais infirmé ou confirmé cette idée défendue depuis de nombreuses années par Hebb (1949).
- (16) Köhler (1925).
- (17) Loizos (1967).
- (18) Thorpe (1963).

CHAPITRE 11

L'HÉRITAGE ET L'ÉVOLUTION DU COMPORTEMENT

11.1 L'héritage du comportement

Selon l'hypothèse de la causalité formative, l'héritage du comportement dépend de l'héritage génétique *et* des champs morphogénétiques qui contrôlent le développement du système nerveux et de l'animal en tant que tout, *ainsi que* des champs moteurs donnés par la résonance morphique des animaux similaires précédents. La théorie traditionnelle argue quant à elle que le comportement inné est « programmé » dans l'ADN.

Peu de recherches expérimentales ont été menées en ce qui concerne l'héritage du comportement, en particulier parce qu'il s'agit d'une notion difficile à quantifier. Néanmoins, diverses tentatives ont été faites : au cours de certaines expériences, les comportements des rats et des souris ont été « mesurés » en fonction de la vitesse de leur course dans les tambours ; de la fréquence et de la durée de leur activité sexuelle ; du nombre des défécations, déterminé comme étant le nombre de selles déposées en un endroit et en un laps de temps donnés ; des facultés d'apprentissage dans le labyrinthe ; et de la sensibilité aux attaques audiogéniques provoquées par des bruits très violents. On a démontré en effectuant des croisements entre des animaux ayant des scores élevés ou des scores bas un composant transmissible de ces réactions : la progéniture tend à avoir des scores avoisinant ceux de leurs parents. (1) Le défaut de ces recherches tient au fait qu'elles n'offrent que peu d'informations quant à l'héritage des *modèles* de comportement ; en outre, les résultats sont difficiles à

interpréter parce qu'ils sont susceptibles d'être influencés par d'innombrables facteurs. Ainsi une vitesse inférieure dans un tambour ou une fréquence réduite d'accouplement pourraient-elles n'être dues qu'à une diminution générale de la vigueur en tant que conséquence d'une déficience métabolique transmissible.

Dans certains cas, les raisons des altérations génétiques du comportement ont fait l'objet de recherches minutieuses. Chez le petit nématode *Caenorhabditis*, certains mutants qui rampent de manière anormale présentent des modifications structurales au niveau du système nerveux. (2) Chez la *Drosophila*, on a constaté que diverses « mutations comportementales », qui abolissent la réaction normale à la lumière, affectent les photorécepteurs ou les neurones visuels périphériques. (3) Chez les souris, on sait qu'un certain nombre de mutations affectent la morphogenèse du système nerveux, conduisant à des défaillances de régions entières du cerveau. Chez les êtres humains, diverses anomalies congénitales du système nerveux sont associées à un comportement anormal, par exemple le syndrome de Down, une forme de mongolisme. Le comportement peut également être affecté par des défaillances physiologiques et biochimiques héréditaires ; ainsi chez l'homme, l'état de phénylcétonurie, associé à l'attardement mental, est-il dû à une déficience de l'enzyme hydroxylase phénylalanine.

Le fait que le comportement inné soit affecté par des modifications génétiquement déterminées dans la structure et dans la fonction des organes sensoriels, du système nerveux, etc., ne prouve pas bien sûr que son héritage ne soit explicable qu'en termes de facteurs génétiques ; il montre essentiellement qu'un corps normal est nécessaire à un comportement normal. Reprenons l'analogie de l'appareil de radio : des modifications dans l'appareil affectent son fonctionnement, mais cela ne prouve pas que la musique diffusée par les haut-parleurs soit originaire de l'appareil lui-même.

Dans le domaine du comportement, des changements biochimiques, physiologiques et anatomiques interdisent parfois l'apparition des germes de structure et, partant, des champs moteurs complets s'en trouvent parfois paralysés ; ou ils exercent divers effets quantitatifs sur les mouvements contrôlés par ces champs. Et en fait des recherches quant à l'héritage de modèles d'action fixe montrent qu'il n'est pas difficile de trouver des variations affectant la performance de façon mineure, mais l'unité apparaît toujours sous une forme tout à fait reconnaissable lorsqu'elle se manifeste. » (4)

L'héritage des champs moteurs dépend sans aucun doute de facteurs précédemment étudiés en relation avec l'héritage des champs morphogénétiques (Chapitre 7). De manière générale, chez les hybrides de deux races ou espèces, la dominance des champs moteurs de l'un sur ceux de l'autre est susceptible de dépendre de la force relative de la résonance morphique des types parentaux (cf Fig. 19). Si l'un appartient à une race ou espèce bien établie et l'autre à une race ou espèce relativement récente n'ayant eu depuis leur apparition qu'une petite population, les champs moteurs de la première devraient être dominants. Mais si les races ou espèces parentales étaient également bien établies, on devrait s'attendre à ce que les hybrides tombent sous l'influence des deux dans une même mesure.

C'est en fait ce qui semble se produire. Dans certains cas, les résultats sont des plus étranges, parce que les modèles de comportement des types parentaux sont mutuellement incompatibles. Les hybrides résultant du croisement de deux sortes d'inséparables nous en offrent un exemple. Les deux espèces parentales construisent leurs nids de feuilles déchiquetées de la même manière, mais alors que l'un (l'inséparable Fischer) les transporte dans son bec, l'autre (l'inséparable à col rose) les transporte parmi ses plumes. Les hybrides déchiquettent les feuilles normalement mais se comportent ensuite de manière très confuse, quelquefois en fichant les lambeaux dans leurs plumes, quelquefois en les transportant dans leur bec. Précisons que même dans le dernier cas, ils hérissent les plumes de leur croupion et agissent comme s'ils tentaient d'y placer des feuilles déchiquetées. (5)

11.2. Résonance morphique et comportement : une expérience

En biologie mécaniste, il existe une distinction très nette entre le comportement inné et le comportement appris : on suppose que le premier est « génétiquement programmé » ou « codé » dans l'ADN, tandis que le second résulte des modifications physico-chimiques dans le système nerveux. Il n'existe aucun moyen concevable par lequel de tels changements modifieraient de manière spécifique l'ADN (ainsi que la théorie lamarckienne le soutenait) ; on considère donc qu'il est impossible que le comportement appris par un animal soit transmis à sa progéniture (à l'exception toutefois de l'« héritage culturel », lequel permet aux parents de transmettre des modèles de comportement à sa progéniture).

En revanche, selon l'hypothèse de la causalité formative, il n'existe

pas de différence d'espèce entre le comportement inné et le comportement appris en ce sens que tous deux dépendent des champs moteurs induits par la résonance morphique (Section 10.1). Cette hypothèse admet donc une transmission possible de comportement appris d'un animal à un autre, et conduit à des prévisions vérifiables qui diffèrent non seulement de celles de la théorie orthodoxe de l'héritage, mais encore de celles de la théorie lamarckienne.

Considérons l'expérience suivante. Des animaux d'une lignée naturelle sont placés dans des conditions où ils apprennent à répondre à un stimulus donné de manière caractéristique. On les oblige alors à reproduire ces modèles de comportement un certain nombre de fois. *Ex hypothesi*, le nouveau champ moteur sera renforcé par la résonance morphique, qui non seulement rendra le comportement des animaux entraînés de plus en plus habituel, mais encore qui affectera, bien que de manière moins spécifique, tout animal semblable exposé au même stimulus : plus grand sera le nombre d'animaux à avoir appris cette tâche dans le passé, plus facile sera l'apprentissage des animaux similaires et subséquents. En conséquence, il devrait être possible dans une expérience de ce type d'observer une augmentation progressive de la vitesse d'apprentissage non seulement chez les animaux descendant des ancêtres entraînés, mais encore chez des animaux génétiquement semblables issus d'ancêtres non entraînés. Cette prévision diffère de celle de la théorie lamarckienne, selon laquelle seuls les descendants d'animaux entraînés apprendraient plus vite, et de la théorie conventionnelle, selon laquelle il n'y aurait aucune augmentation de la vitesse d'apprentissage des descendants des animaux entraînés *ou* non entraînés.

Pour résumer : une augmentation de la vitesse d'apprentissage chez des générations successives des lignées entraînées ou non entraînées supporterait l'hypothèse de la causalité formative ; une augmentation chez les seules lignées entraînées, la théorie lamarckienne ; et une absence d'augmentation, la théorie orthodoxe.

De telles expériences ont déjà été réalisées. Les résultats abondent dans le sens de l'hypothèse de la causalité formative.

L'expérience originale fut menée par McDougall à Harvard en 1920 afin de fournir une vérification de la possibilité de l'héritage lamarckien. Les animaux étaient des rats blancs, de la lignée Wistar, qui avaient été soigneusement croisés en laboratoire depuis de nombreuses générations. Leur tâche consistait à apprendre à s'échapper d'un réservoir d'eau spécialement construit en nageant vers l'un des

deux passages servant à l'évacuation de l'eau. Le « mauvais » passage était brillamment éclairé, alors que le « bon » ne l'était pas. Si le rat s'engageait dans le passage illuminé, il recevait une décharge électrique. Les deux passages étaient illuminés de manière alternative. Le nombre d'erreurs commises par un rat avant qu'il n'apprenne à quitter le réservoir par le passage non illuminé permettait de mesurer sa vitesse d'apprentissage :

« Certains rats étaient immergés plus de 330 fois — ils recevaient des décharges électriques dans plus ou moins 50 % des cas — avant d'apprendre à éviter le passage illuminé. Le processus d'apprentissage atteignait de manière soudaine un point critique. L'animal présentait pendant longtemps une aversion marquée pour le passage illuminé, hésitant fréquemment devant lui, faisant demi-tour ou l'empruntant avec une précipitation désespérée ; mais n'ayant pas saisi la simple relation de la corrélation constante entre la lumière et la décharge, il continuait à emprunter le passage éclairé aussi souvent, ou presque aussi souvent, que l'autre. Enfin il en arrivait à un point de son entraînement auquel il se détournait définitivement et résolument de la lumière, cherchait le passage obscur et s'y engageait tranquillement. A ce stade, aucun animal ne commettait plus l'erreur d'emprunter le passage illuminé, ou seulement en des occasions exceptionnelles. » (6)

Dans chaque génération, les rats à partir desquels la génération suivante fut obtenue étaient sélectionnés au hasard *avant* l'estimation de leur vitesse d'apprentissage bien que l'accouplement n'intervînt que lorsqu'ils avaient été testés. Cette procédure était adoptée pour éviter toute possibilité de sélection consciente ou inconsciente en faveur des rats apprenant rapidement.

Cette expérience porta sur trente-deux générations et demanda quinze ans. En accord avec la théorie lamarckienne, on constata une tendance marquée à apprendre plus rapidement chez les rats des générations successives. Ceci ressort du nombre moyen d'erreurs faites par les rats des huit premières générations, qui était de plus de 56, comparé au 41, 29 et 20 des deuxième, troisième et quatrième groupes de huit générations. (7) La différence était non seulement apparente dans les résultats quantitatifs, mais encore dans le comportement des rats, qui devinrent de plus en plus prudents au fil des générations. (8)

McDougall anticipa la critique voulant qu'en dépit de sa sélection au hasard des parents dans chaque génération, un avantage quelconque en faveur des rats apprenant rapidement pût néanmoins s'être insinué. Afin de vérifier cette possibilité, il entreprit une nouvelle expérience avec un échantillon différent de rats, dont les parents avaient été sélectionnés en fonction de leur score d'apprentissage. Dans un groupe et pour chaque génération, seuls ceux qui apprenaient rapidement servaient au croisement et dans l'autre groupe, seuls ceux qui apprenaient lentement. Ainsi qu'on pouvait s'y attendre, la progéniture de ceux qui apprenaient vite tendait à apprendre relativement vite, alors que celle de ceux qui apprenaient lentement apprenait relativement lentement. Cependant, même dans le dernier groupe, la performance des générations ultérieures s'améliora de façon notoire, en dépit de la sélection répétée en faveur de l'apprentissage lent (Fig. 28).

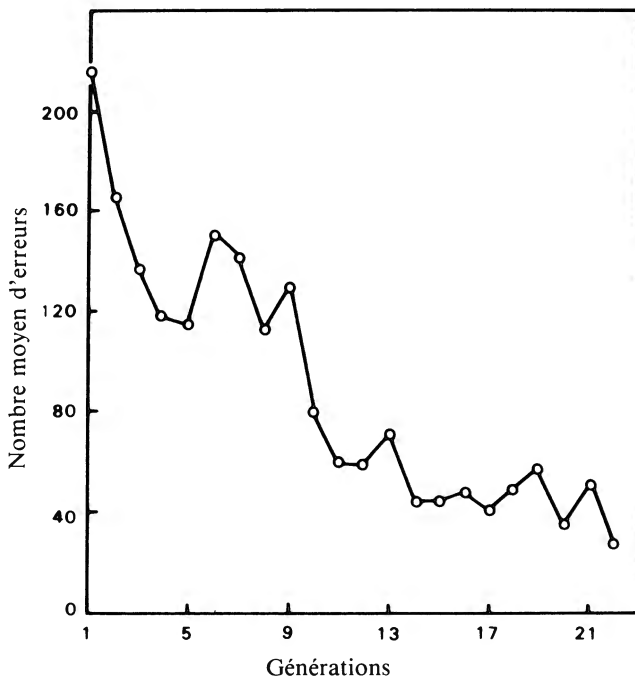


FIGURE N° 28. Nombre moyen d'erreurs dans les générations successives de rats sélectionnés dans chaque génération pour la lenteur de leur apprentissage. (Informations de McDougall, 1938).

Ces expériences furent réalisées avec soin et les critiques furent incapables de réfuter les résultats pour cause de vices techniques. Ils relevèrent cependant une faiblesse sur le plan expérimental : McDougall avait négligé de tester systématiquement le changement de la vitesse d'apprentissage des rats dont les parents n'avaient pas été entraînés.

Un de ces critiques, F.A.E. Crew d'Edimbourg répéta l'expérience de McDougall avec des rats issus de la même lignée, en utilisant un réservoir semblable. Il ajouta une lignée parallèle de rats « non entraînés » ; la vitesse d'apprentissage de certains d'entre eux fut testée dans chaque génération, tandis que d'autres qui n'étaient pas testés servaient de parents aux prochains. Sur les dix-huit générations de cette expérience, Crew ne découvrit aucun changements systématiques du taux d'apprentissage, qu'il s'agît de lignée entraînée ou non. (9) Ceci jetait donc un doute sérieux sur les découvertes de McDougall. Cependant les résultats de Crew n'étaient pas directement comparables, et cela pour trois raisons. Premièrement, pour une raison quelconque les rats apprenaient plus facilement la tâche dans cette expérience que ceux des premières générations de McDougall. Cet effet était si marqué qu'un nombre considérable de rats des lignées entraînées ou non entraînées apprirent la tâche immédiatement sans recevoir une seule décharge ! Les scores moyens des rats de Crew étaient semblables dès le début de l'expérience à ceux de McDougall après plus de trente générations entraînées. Ni Crew ni McDougall ne furent capables de fournir une explication satisfaisante quant à cette antinomie. Mais comme McDougall le souligna, l'objectif de la recherche étant d'éclairer tout effet de l'entraînement sur les générations ultérieures, une expérience au cours de laquelle certains rats n'avaient reçu aucun entraînement et de nombreux autres très peu ne saurait prétendre avoir démontré cet effet. (10) Deuxièmement, les résultats de Crew présentaient des fluctuations importantes et apparemment aléatoires d'une génération à une autre — beaucoup plus importantes que celles constatées par McDougall — lesquelles pouvaient avoir masqué une tendance à l'amélioration des scores des générations ultérieures. Troisièmement, Crew adopta une politique de croisement consanguin intensif, n'accouplant que les frères avec les sœurs dans chaque génération. Il n'escomptait pas que cela présentât des effets contraires, puisqu'au départ les rats étaient issus d'une même souche naturelle :

« L'histoire de ma souche se lit comme une expérience de croisement. Il y a une large base de lignées familiales et un sommet étroit de deux lignées restantes. Le taux de reproduction chute et s'éteint lignée après lignée. » (11)

Même dans les lignées survivantes, nombre d'animaux naquirent avec des anomalies si sérieuses qu'ils durent être écartés. Les effets nuisibles de ce croisement sévère pourraient avoir dissimulé une tendance à l'amélioration du taux d'apprentissage. Dans l'ensemble, les insuffisances de l'expérience de Crew signifient qu'il est impossible de considérer les résultats comme concluants ; et il était lui-même convaincu que la question était irrésolue. (12)

Les choses n'en demeurèrent heureusement pas là. L'expérience fut reprise par W.E. Agar et ses collègues à Melbourne. Ils utilisèrent des méthodes qui ne présentaient pas les désavantages de celles de Crew. Ils mesurèrent, sur un laps de temps de vingt ans, les taux d'apprentissage de lignées entraînées et non entraînées pour cinquante générations successives. En accord avec McDougall, ils découvrirent qu'il existait une tendance marquée chez les rats de la lignée entraînée à apprendre plus vite dans les générations ultérieures. *Mais la même tendance fut également découverte dans les lignées non entraînées.* (13)

D'aucuns s'étonneront du fait que McDougall n'avait pas observé un effet semblable chez ses propres lignées non entraînées. Il l'avait en fait constaté. En dépit du fait qu'il ne procédait qu'occasionnellement au contrôle des rats issus de la souche originale non entraînée, il remarqua « le fait troublant que les groupes de contrôle dérivés de sa souche en 1926, 1927, 1930 et 1932 montraient une diminution du nombre moyen des erreurs pour la période allant de 1927 à 1932. » Il pensait que ce résultat était fortuit, mais il ajouta :

« Il est possible que la chute du nombre moyen des erreurs de 1927 à 1932 représente un réel changement de constitution de la souche entière, une amélioration (de cette faculté particulière) dont je suis incapable de préciser la nature ». (14)

La controverse quant à l'expérience lamarckienne de McDougall arriva à son terme avec la publication du rapport final de l'équipe d'Agar en 1954. L'amélioration semblable des lignées entraînées et non entraînées élimina une interprétation lamarckienne. La *conclu-*

sion de McDougall était réfutée, et il semblait que ceci mettait un terme à la question. En revanche, ses *résultats* étaient confirmés.

Ces résultats semblaient tout à fait inexplicables ; ils n'avaient aucun sens en fonction des idées courantes et ils ne firent l'objet d'aucune investigation ultérieure. Mais ils acquièrent un sens à la lumière de l'hypothèse de la causalité formative. Il est évident qu'ils ne la *prouvent* pas ; il est toujours possible de suggérer d'autres explications, par exemple que les générations successives de rats deviennent de plus en plus intelligentes pour une raison inconnue non liée à leur entraînement. (15)

Dans les expériences futures, la manière la moins ambiguë de vérifier les effets de la résonance morphique consisterait probablement à obliger un grand nombre de rats (ou d'autres animaux) à apprendre une nouvelle tâche en un lieu donné ; et ensuite à voir s'il existe une augmentation de la capacité des rats à apprendre à réaliser la même tâche en un autre endroit situé à plusieurs centaines de kilomètres. La vitesse initiale d'apprentissage dans les deux lieux devrait être plus ou moins semblable. Puis, selon l'hypothèse de la causalité formative, la vitesse d'apprentissage devrait augmenter de manière progressive à l'endroit où le plus grand nombre de rats sont entraînés ; et une augmentation semblable devrait également être détectée dans le second endroit, en dépit du fait que très peu de rats y ont été entraînés. Il est évident que des précautions devraient être prises pour éviter toute influence éventuelle consciente ou inconsciente de la part des chercheurs. Un moyen consisterait pour les chercheurs du second endroit à tester la capacité d'apprentissage des rats pour plusieurs tâches *différentes*, à intervalles réguliers, disons mensuellement. Puis, au premier endroit, la tâche particulière à laquelle des milliers de rats seraient entraînés serait choisie au hasard parmi cet ensemble. En outre, le moment auquel l'entraînement commencerait serait également choisi au hasard ; par exemple quatre mois après que les tests réguliers auront débuté au second endroit. Il conviendrait de ne révéler aux chercheurs du second endroit ni la tâche sélectionnée ni le moment auquel l'entraînement a débuté au premier endroit. Si, en de telles conditions, une augmentation marquée de la capacité d'apprentissage de la tâche sélectionnée était observée dans le second endroit après que l'entraînement eut commencé au premier, ce résultat fournirait alors une preuve satisfaisante en faveur de l'hypothèse de la causalité formative.

Un tel effet pourrait être intervenu quand Crew et l'équipe d'Agar

ont repris les travaux de McDougall. Dans les deux cas, leurs rats commencèrent à apprendre la tâche beaucoup plus vite que ceux de McDougall au début de l'expérience. (16)

Si l'expérience proposée ci-dessus était vraiment réalisée, et si elle donnait des résultats positifs, elle ne serait pas totalement reproductible de par sa nature même puisque les rats y participant seraient influencés par la résonance morphique des rats impliqués dans l'expérience originale. Pour démontrer le même effet, il serait nécessaire de changer soit la tâche, soit l'espèce utilisée à chaque expérience.

11.3. L'évolution du comportement

La fossilisation ne révèle pratiquement rien du comportement des animaux passés alors qu'il fournit une indication directe de leur structure. En conséquence, nombre d'idées quant à l'évolution du comportement ne peuvent se fonder sur des preuves issues du passé, mais uniquement sur des comparaisons entre des espèces existant à l'heure actuelle. Ainsi des théories peuvent-elles être élaborées quant à l'évolution du comportement social chez les abeilles en comparant des espèces sociales existantes avec des espèces solitaires et avec celles vivant en colonie supposées être plus primitives. Ces théories semblent être plausibles, pourtant elles n'en demeurent pas moins spéculatives. (17) En outre, les théories de l'évolution du comportement dépendent de *suppositions* quant à la manière dont le comportement est hérité puisque nos connaissances à ce sujet sont insignifiantes.

La théorie mécaniste ou néo-darwinienne prétend que le comportement inné est « programmé » ou « codé » dans l'ADN, et que les nouveaux types de comportement sont dus à des mutations au hasard. La sélection naturelle favorise ensuite des mutants propices ; d'où l'évolution des instincts. On suppose également que les mutations au hasard confèrent aux animaux des aptitudes pour des types particuliers d'apprentissage. Les animaux dont la survie et la reproduction tirent profit de ces aptitudes sont donc favorisés par la sélection naturelle. D'où l'évolution des capacités d'apprentissage. Un comportement appris qui tend à devenir inné est également imputable à des mutations au hasard en raison de l'effet hypothétique de Baldwin : des animaux réagissent à de nouvelles situations en apprenant à se comporter de manière appropriée ; les mutations au hasard qui font que ce comportement se manifeste sans apprentissage seront

favorisées par la sélection naturelle ; le comportement qui au départ était appris devient ainsi inné, non pas en raison d'un héritage de caractéristiques acquises mais parce que des mutations appropriées interviennent.

Il n'existe pratiquement aucune limite à ce qui est explicable en invoquant les mutations propices au hasard, lesquelles modifient la « programmation génétique » du comportement. Il est possible de développer ces théories néo-darwiniennes sous une forme mathématique grâce à des calculs se fondant sur les formules de la génétique de la population théorique. (18) Mais dans la mesure où ces spéculations sont invérifiables, elles ne présentent aucune valeur indépendante ; elles précisent simplement les suppositions mécanistes desquelles elles procèdent.

L'hypothèse de la causalité formative conduit à des interprétations très différentes de l'évolution du comportement. On devrait s'attendre à ce que la sélection naturelle engendre des altérations dans le « patrimoine génétique » des populations dans la mesure où des changements génétiques influencent le comportement. Mais les modèles spécifiques de comportement dépendent eux-mêmes de l'héritage des champs moteurs par résonance morphique. Plus un modèle spécifique de comportement est reproduit, plus forte sera la résonance morphique. Ainsi la répétition d'un comportement instinctif tendra-t-elle à fixer de plus en plus les instincts. En revanche, si les modèles de comportement varient d'un individu à un autre, la résonance morphique n'engendrera pas de chréodes bien définies ; ce qui explique que le comportement sera moins stéréotypé. Et plus la variété de comportement sera vaste, plus l'étendue pour la variation dans les générations futures sera vaste. Ce type d'évolution, dans une direction permettant l'émergence de l'intelligence, est intervenue dans une certaine mesure chez les oiseaux, chez les mammifères dans une mesure plus importante, et plus encore chez l'homme.

Dans certains cas le comportement semi-appris a évolué à partir d'un domaine au sein duquel il était tout à fait instinctif. Cela pourrait s'être produit par l'hybridation de races ayant des chréodes différentes, donnant naissance à des champs moteurs composés disposant de plus d'étendue pour la variation individuelle.

Dans d'autres cas, un comportement semi-instinctif peut avoir évolué à partir d'un comportement qui était à l'origine appris suite à une répétition fréquente. Considérons par exemple le comportement de différentes races de chiens. Les chiens de bergers ont été entraînés

et sélectionnés durant maintes générations pour leur capacité à rassembler les troupeaux, les retrievers à rapporter les proies, les pointers à les désigner, les chiens courants à chasser le renard, etc. Les chiens affichent souvent une tendance innée en ce qui concerne le comportement caractéristique de leur race même lorsqu'ils n'ont pas été entraînés. (19) Ces tendances ne sont peut-être pas suffisamment fortes pour être nommées instinct, mais elles sont suffisamment fortes pour montrer qu'il n'existe qu'une différence de degré entre l'instinct et une prédisposition héréditaire à apprendre des types particuliers de comportement. Il est évident que les races canines ont évolué sous des conditions de sélection artificielle plutôt que naturelle, mais il semble que les mêmes principes soient applicables dans les deux cas.

S'il est relativement facile d'imaginer comment certains types de comportements instinctifs se sont développés par la répétition de comportements appris génération après génération, cela n'explique pas de manière fiable l'évolution de tous les types d'instincts, en particulier chez les animaux ayant une aptitude limitée pour l'apprentissage. Il est possible que de nouveaux instincts aient émergé de nouvelles permutations et combinaisons d'instincts préexistants ; ceci pourrait se produire via l'hybridation de races ou d'espèces présentant différents modèles de comportement. Une autre façon selon laquelle de nouvelles combinaisons pourraient intervenir implique l'incorporation d'« activités de déplacement », les actions apparemment hors de propos réalisées par des animaux « déchirés » entre des instincts conflictuels. Certains éléments des rituels de cour résultent peut-être d'une telle action. (20) Il serait également concevable que des mutations ou que des expositions à des environnements inhabituels permettent à un animal de s'« harmoniser » aux chréodes motrices d'autres espèces (cf Section 8.6).

Mais outre la recombinaison des chréodes existantes, il doit exister un moyen par lequel des champs moteurs entièrement nouveaux se manifestent chez des animaux dont le comportement est presque entièrement instinctif. Des modèles nouveaux de comportement n'émergent que si la répétition usuelle de comportements ancestraux est bloquée, soit par une modification environnementale soit par une mutation altérant la morphogenèse ou la physiologie normale de l'animal. Dans la plupart de ces cas, l'animal agira de manière inefficace et non coordonnée, mais occasionnellement un nouveau champ moteur apparaîtra. Et quand un nouveau champ apparaît pour la

première fois, il doit y avoir un « saut » qui ne peut être tout à fait expliqué en termes de causes énergétiques ou formatives précédentes. (Sections 5.1, 8.7)

Si le modèle de comportement dû à un nouveau champ moteur endommage la capacité des animaux à survivre et à se reproduire, il ne sera pas répété très souvent puisque les animaux persistant dans ce comportement seront éliminés par la sélection naturelle. Mais si le modèle de comportement aide les animaux qui l'exécutent à survivre et à se reproduire, il tendra à être répété fréquemment et sera de plus en plus renforcé par la résonance morphique. Ainsi le champ moteur sera-t-il favorisé par la sélection naturelle.

11.4. Comportement humain

Les animaux supérieurs se conduisent souvent de manière plus souple que les animaux inférieurs. Cependant cette souplesse ne concerne que les stades précoces d'une séquence comportementale, et en particulier la phase initiale de l'appétence, les stades suivants et surtout le stade final, l'action achevée, sont réalisés de manière stéréotypée comme les modèles d'action fixe. (Section 10.1)

Selon le modèle paysager, un champ moteur majeur peut être représenté par une vaste vallée qui se rétrécit ensuite et devient de plus en plus escarpée pour se terminer par un profond canyon (Fig. 27 B). La vaste vallée correspond à la phase de l'appétence, au cours de laquelle différentes voies peuvent être suivies ; ces voies convergent lorsqu'elles sont « canalisées » vers la chréode finale hautement canalisée de l'acte achevé.

Dans le comportement humain, les différents moyens d'atteindre les objectifs comportementaux sont beaucoup plus nombreux que chez les autres espèces, mais les mêmes principes semblent appliqués : sous l'influence de champs moteurs de niveau supérieur, des modèles d'action sont « canalisés » vers des actes achevés stéréotypés qui sont en général innés. Par exemple, les individus obtiennent leur nourriture par toutes sortes de moyens, soit directement par la chasse, la cueillette, la pêche, l'élevage, soit indirectement en la gagnant en accomplissant différentes tâches. La nourriture est ensuite préparée et cuisinée de diverses façons et placée dans la bouche par divers moyens, par exemple avec la main, avec des baguettes ou avec une cuillère. Mais il existe peu de différences dans la manière dont la nourriture est mâchée, et l'acte achevé du champ moteur

entier de l'alimentation est semblable chez tous les hommes. De la même manière dans le comportement gouverné par le champ moteur de la reproduction, les méthodes de cours et les systèmes de mariage diffèrent énormément, mais l'acte achevé de copulation vers lequel ils conduisent est plus ou moins stéréotypé. Chez le mâle, le modèle final d'action fixe, celui de l'éjaculation, relève de l'automatisme et est en fait inné.

Ainsi, les modèles très variés de comportements humains sont-ils en général dirigés vers un nombre limité d'objectifs déterminés par le champ moteur hérité des membres précédents de l'espèce par résonance morphique ; en général ces objectifs sont liés au développement, à la préservation ou à la reproduction du groupe social ou individuel. Même le jeu et l'activité préparatoire non immédiatement dirigés vers de tels objectifs aide souvent à les réaliser ultérieurement, comme c'est le cas dans d'autres espèces. Car ni le jeu ni le « comportement de l'appétence exploratoire généralisé » en l'absence de récompense immédiate ne sont l'apanage de l'homme : les rats explorent leur environnement et les objets même lorsqu'ils sont repus. (21)

Cependant toute activité humaine n'est pas exclusivement subordonnée au champ moteur qui la canalise vers des objectifs biologiques ou sociaux ; une partie est explicitement dirigée vers des fins transcendantes. La vie des saints illustre ce type de comportement, mais il est évident que la plupart des comportements humains ne possèdent pas une telle direction transcendante.

Bien que l'éventail de comportements humains soit très vaste quand on considère l'espèce dans son ensemble, dans toute société donnée les activités des individus tendent à tomber dans un nombre limité de modèles standards. Les gens répètent en général des activités caractéristiquement structurées, lesquelles ont déjà été réalisées maintes fois par les nombreuses générations précédentes. Ceci inclut le fait de parler une langue particulière, les compétences motrices associées à la chasse, à la culture, au tissage, à la fabrication des outils, à la cuisine, etc. ; les chants et les danses ; et les types de comportements spécifiques à des rôles particuliers.

Tous les modèles d'activité caractéristique d'une culture donnée peuvent être considérés comme des chréodes. (2) Plus elles seront répétées plus elles seront stabilisées. Mais en raison de la variété étonnante des chréodes de cultures spécifiques, chacune d'elles pouvant potentiellement canaliser les mouvements de tout être humain, la résonance morphique ne pourra pas par elle-même conduire un indi-

vidu dans un ensemble de chréodes plutôt que dans un autre : ainsi aucun de ces modèles de comportement ne se manifeste-t-il spontanément. Tous doivent être appris. Un individu est *initié* à des modèles particuliers de comportement par la société. Puis lorsque le processus d'apprentissage commence, en général par l'imitation, la réalisation d'un modèle caractéristique de mouvement place l'individu en résonance morphique avec tous ceux qui ont exécuté ce modèle de mouvement dans le passé. L'apprentissage est donc facilité lorsque l'individu s'« accorde » à des chréodes spécifiques.

Les processus d'initiation sont traditionnellement compris en termes semblables à ceux-ci. Les individus sont censés entrer dans les états ou dans des modes d'existence qui leurs sont antérieurs et qui possèdent une sorte de réalité transpersonnelle.

La facilitation de l'apprentissage par la résonance morphique serait difficile à démontrer empiriquement dans les cas de modèles de comportement établis depuis longtemps ; mais une modification du taux d'apprentissage devrait être décelable avec des modèles moteurs d'origine récente. Ainsi par exemple, à l'heure actuelle il devrait être devenu progressivement plus facile d'apprendre à monter à bicyclette, à conduire une automobile, à jouer du piano, ou à utiliser une machine à écrire, compte tenu de la résonance morphique cumulative d'un grand nombre de personnes ayant déjà acquis ces talents. Cependant même si des informations quantitatives sûres montraient que les capacités d'apprentissage avaient en fait augmenté, l'interprétation serait compliquée par l'influence probable d'autres facteurs tels qu'une amélioration de la conception de la machine, de meilleures méthodes d'enseignement et une motivation plus puissante à apprendre. Mais avec des expériences conçues spécialement au cours desquelles des précautions auraient été prises pour maintenir ces facteurs constants, il pourrait être possible d'obtenir des preuves convaincantes de l'effet prévu.

L'hypothèse de la causalité formative s'applique à tous les aspects du comportement humain dans lesquels des modèles particuliers de mouvement sont répétés. Mais elles n'expliquent pas l'origine de ces modèles. Ici comme ailleurs le problème de la créativité se situe au-delà du domaine des sciences naturelles, et seule une réponse se fondant sur la métaphysique pourrait être apportée. (cf Sections 5.1, 8.7 et 11.3)

NOTES

- (1) Parsons (1967).
- (2) Brenner (1973).
- (3) Berzer (1973).
- (4) Manning (1975).
- (5) Dilger (1962).
- (6) McDougall (1927).
- (7) McDougall (1938).
- (8) McDougall (1930).
- (9) Crew (1936).
- (10) McDougall (1938).
- (11) Crew (1936).
- (12) Tinbergen (1951).
- (13) Agar, Drummond, Tiegs et Gunson (1954).
- (14) Rhine et McDougall (1933).

(15) Un certain nombre d'explications possibles ont été suggérées à l'époque où ces expériences étaient menées ; elles sont discutées dans les articles de McDougall, auxquels le lecteur intéressé se référera. Aucune de ces explications ne s'est avérée plausible lors d'un examen approfondi.

Agar et son équipe (1954) remarquèrent que les fluctuations dans les capacités d'apprentissage étaient associées à des changements, s'étendant sur plusieurs générations, en ce qui concerne la santé et la vigueur des rats. McDougall avait déjà remarqué un effet semblable. Une analyse statistique montra qu'il existait en fait une corrélation minime mais significative (au niveau de 1 % de probabilité) entre la vigueur (mesurée en termes de fertilité) et les vitesses d'apprentissage chez la lignée « entraînée », mais pas chez la lignée « non entraînée ». Cependant si seules les quarante premières générations étaient prises en considération, les coefficients de corrélation étaient quelque peu supérieurs : 0,40 chez la lignée « entraînée », et 0,42 chez la lignée non entraînée. Mais alors que cette corrélation pourrait aider à expliquer les fluctuations des résultats, elle ne pourrait expliquer de manière plausible la direction globale. Selon la théorie statistique standard, la proportion de variation « expliquée » par une variable corrélative est donnée par le carré du coefficient de corrélation, dans ce cas $(0,4)^2 = 0,16$. En d'autres termes, des variations dans la vigueur n'expliquent que seize pour cent des modifications du taux d'apprentissage.

(16) McDougall estimait que le nombre moyen des erreurs dans sa première génération était supérieur à 165. Dans l'expérience de Crew, ce chiffre était de 24, et dans celle d'Agar, de 72 ; voir les discussions de Crew (1936) et d'Agar, Drummond et Tiegs (1942). Si l'équipe d'Agar avait utilisé des rats de parenté identique et suivi les mêmes procédures que Crew, son score initial aurait été encore inférieur au sien. Cependant, compte tenu des différentes parentés de leurs rats, et des différences de leurs procédures de vérification, les résultats ne sont pas tout à fait comparables. Néanmoins la facilité d'apprentissage caractérisant ces dernières expériences est évocatrice.

(17) Brown (1975).

(18) De nombreux exemples de ce type de spéculation sont présents chez Wilson (1975) et Dawkins (1976).

(19) E. g. Clarke (1980).

(20) Tinbergen (1951).

(21) Thorpe (1963).

(22) Le langage en particulier fournit un excellent exemple de l'organisation hiérarchique des champs moteurs et R. Thom a déjà élaboré les prémisses d'une théorie du langage en termes de chrôdes ; voir son ouvrage *Stabilité structurelle et morphogenèse*, chapitre 6.

CHAPITRE 12

QUATRE CONCLUSIONS POSSIBLES

12.1. L'hypothèse de la causalité formative

La présentation de l'hypothèse de la causalité formative dans les chapitres précédents de ce livre ne peut être considérée que comme une esquisse préliminaire : elle est susceptible d'être étudiée de manière plus approfondie tant dans le domaine de la biologie que de la physique. Mais jusqu'à ce que certaines de ces prévisions aient été vérifiées, il n'y aura que peu d'empressement à entreprendre cette tâche : seule l'obtention de résultats objectifs convaincants permettrait d'y donner suite, au moins dans sa forme présente. Des exemples de tests expérimentaux possibles ont été présentés dans les sections 5.6, 7.4, 11.2 et 11.4 ; et maints autres pourraient être imaginés.

L'hypothèse de la causalité formative est une hypothèse vérifiable quant aux régularités objectivement observables dans la nature. Elle ne fournit aucune réponse en ce qui concerne l'origine des nouvelles formes et des nouveaux modèles de comportement, ou la réalité de l'expérience subjective. Seules des théories de plus grande envergure que celles des sciences naturelles apporteraient des réponses à de telles questions, en d'autres termes des théories métaphysiques.

A l'heure actuelle, les questions scientifiques et métaphysiques sont souvent confondues l'une l'autre, en raison de l'étroite connexion existant entre la théorie mécaniste de la vie et la théorie métaphysique du matérialisme. La dernière serait encore défendable si la théorie mécaniste était remplacée en biologie par l'hypothèse de

la causalité formative ou en fait par toute autre hypothèse. Mais elle perdrait sa position privilégiée ; elle entrerait en compétition libre avec les autres théories métaphysiques.

Quatre théories métaphysiques sont brièvement exposées dans les sections suivantes afin d'illustrer la distinction entre les domaines scientifiques et métaphysiques. Elles sont toutes compatibles avec l'hypothèse de la causalité formative et du point de vue de la science naturelle, le choix entre elles est tout à fait ouvert.

12.2. Matérialisme modifié

Le matérialisme part du principe que seule la matière est réelle ; donc tout ce qui existe est soit matière, soit entièrement dépendant pour son existence de la matière. Cependant le concept de la matière n'a pas de signification précise ; à la lumière de la physique moderne, il a déjà été étendu de manière à inclure les champs physiques, et les particules matérielles sont à présent considérées comme des formes d'énergie. La philosophie du matérialisme a donc été modifiée en conséquence.

Les champs morphogénétiques et les champs moteurs sont associés à des systèmes matériels ; ils peuvent également être considérés comme des aspects de la matière (section 3.4). Le matérialisme pourrait donc être modifié jusqu'à inclure l'idée de la causalité formative. (1) Dans la discussion suivante, nous qualifierons cette nouvelle forme de philosophie matérialiste de matérialisme modifié.

Le matérialisme nie *a priori* l'existence de toute action causale immatérielle ; le monde physique est considéré comme étant causalement clos. Donc une chose est telle qu'un soi immatériel agissant sur le corps est inconcevable puisque ceci semble issu d'un point de vue subjectif. En d'autres termes, l'expérience consciente est soit dans une certaine mesure la même chose que les états matériels du cerveau, soit elle côtoie simplement ces états sans les affecter. (2) Mais alors que dans le matérialisme conventionnel, on considère que les états du cerveau sont déterminés par une combinaison de causalités énergétiques et d'événements fortuits, dans le matérialisme modifié, ils seraient en outre déterminés par la causalité formative. En fait, mieux vaudrait considérer que l'expérience consciente est un aspect ou épiphénomène des champs moteurs agissant sur le cerveau.

L'expérience subjective du libre arbitre ne peut *ex hypothesi* correspondre à l'influence causale d'un soi immatériel sur le corps.

Cependant il est concevable que certains des événements fortuits dans le cerveau puissent être subjectivement expérimentés comme des libres choix ; mais cette liberté apparente ne serait rien de plus qu'un aspect ou épiphénomène de l'activation au hasard d'un des champs moteurs plutôt que d'un autre.

Si toute expérience consciente n'est qu'un accompagnement des, ou un déroulement parallèle aux, champs moteurs agissant sur le cerveau, alors la mémoire consciente, comme la mémoire des habitudes motrices (cf Section 10.1) dépendrait de la résonance morphique des états précédents du cerveau. Ni les souvenirs conscients, ni les souvenirs inconscients ne seraient emmagasinés dans le cerveau.

Dans le contexte du matérialisme conventionnel, l'évidence des phénomènes parapsychologiques ne peut être que niée ou réfutée dans la mesure où elle semble inexplicable en termes de causalité énergétique. Le matérialisme modifié permettrait une attitude plus positive. Car il n'est pas inconcevable que certains de ces phénomènes s'avèrent être compatibles avec l'hypothèse de la causalité formative : en particulier il serait possible de formuler une explication de la télépathie en termes de résonance morphique, (3) et de la psychokinèse en termes de modification des événements probabilistes au sein d'objets placés sous l'influence des champs moteurs. (4)

L'origine de formes nouvelles, de nouveaux modèles de comportements et de nouvelles idées ne peut être expliquée en termes de causes énergétiques et formatives préexistantes (Section 5.1, 8.7, 11.3 et 11.4). En outre, le matérialisme nie l'existence de tout acte créatif immatériel pouvant les avoir engendrés. Ils n'ont donc pas de cause. Leur origine doit en conséquence être attribuée au hasard, et l'évolution ne peut être considérée qu'en termes d'effets combinés de hasard et de nécessité physique.

En résumé, selon cette philosophie modifiée du matérialisme, l'univers est composé de matière et d'énergie qui sont soit éternelles soit d'origine inconnue, organisée au sein d'une gigantesque variété de formes inorganiques et organiques qui toutes apparaissent au hasard, gouverné par des lois inexplicables. L'expérience consciente est soit un aspect des, ou un déroulement parallèle aux, champs moteurs agissant sur le cerveau. Toute la créativité humaine, à l'instar de la créativité évolutive, est en définitive imputable au hasard. Les êtres humains adoptent leurs croyances (y compris la croyance au matérialisme) et exécutent leurs actions suite à des événements fortuits et à des nécessités physiques dans le cerveau. La vie humaine n'a

aucun objectif au-delà de la satisfaction des besoins biologiques et sociaux ; et l'évolution de la vie, et l'univers en tant que tout sont dépourvus d'objectifs et d'orientation.

12.3. Le soi conscient

A l'encontre de la philosophie du matérialisme, on peut admettre que le soi conscient possède une réalité qui n'est pas simplement dérivée de la matière. On peut accepter, plutôt que nier, que le propre soi conscient de l'individu dispose de la faculté de faire des libres choix. On peut donc supposer par analogie également que d'autres individus sont des êtres conscients dotés de la même faculté.

Ce « lieu commun » conduit à la conclusion voulant que le soi conscient et que le corps *interagissent*. Mais dans ce cas comment cette interaction se déroule-t-elle ?

Dans le contexte de la théorie mécaniste de la vie, le soi conscient est considéré comme une sorte de « fantôme dans la machine » (5). Pour les matérialistes, cette notion relève de l'absurde. Et même les défenseurs de la position interactionniste se sont avérés incapables de préciser comment l'interaction intervient, au-delà de la vague suggestion qu'elle dépendrait d'une façon quelconque d'une modification des événements quantiques dans le cerveau. (6)

L'hypothèse de la causalité formative permet d'envisager sous un jour nouveau cette question. Rien n'interdit de considérer que le soi conscient n'interagit pas avec une machine mais avec des champs moteurs. Ces derniers sont associés au corps et dépendent de ses états physico-chimiques. Mais le soi n'est pas semblable aux champs moteurs pas plus que son expérience n'est parallèle aux changements induits dans le cerveau par la causalité énergétique et formative. Il « pénètre » les champs moteurs, mais il demeure sur et au-dessus d'eux.

A travers ces champs, le soi conscient est en relation étroite avec l'environnement externe et avec les états du corps dans la perception et dans l'activité consciemment contrôlées. Mais l'expérience subjective qui n'est pas directement concernée par l'environnement présent et par l'action immédiate — par exemple dans les rêves, les rêveries et la pensée discursive — n'a pas nécessairement besoin de comporter une relation étroite avec les causes énergétiques et formatives agissant sur le cerveau.

Cette conclusion semble contredire à première vue l'évidence mon-

trant que les états de conscience sont souvent associés à des activités physiologiques caractéristiques. Les rêves par exemple, tendent à être accompagnés de mouvements oculaires rapides et de rythmes électriques de fréquences particulières dans le cerveau (7). Mais de telles évidences ne prouvent pas que les détails spécifiques des rêves se déroulent en parallèles à ces changements physiologiques : ces derniers peuvent n'être qu'une conséquence non spécifique de l'entrée de la conscience dans l'état de rêve.

On comprendra mieux ce point si l'on recourt à une analogie. Considérons l'interaction entre une automobile et son conducteur. Dans certaines conditions, quand l'automobile est conduite, ses mouvements sont étroitement liés aux actions du conducteur et dépendent de sa perception de la route, des panneaux de signalisation, des cadrans indiquant l'état interne du véhicule, etc. Mais en d'autres circonstances, cette relation est moins étroite : par exemple, quand la voiture est à l'arrêt et que le moteur tourne alors que le conducteur consulte une carte routière. Bien qu'il existe une relation générale entre l'état de la voiture et les gestes du conducteur — il ne peut lire en conduisant — il n'y aura aucune connexion spécifique entre les vibrations du moteur et les caractéristiques de la carte étudiée. De la même manière, l'activité électrique rythmique du cerveau ne comporte aucune relation spécifique avec les images expérimentées dans les rêves.

Si le soi conscient présente des propriétés particulières, irréductibles à celles de la matière, de l'énergie, des champs morphogénétiques et des champs moteurs, il n'y a aucune raison pour que les souvenirs conscients — par exemple les souvenirs spécifiques d'événements passés — ou bien soient emmagasinés matériellement dans le cerveau, ou bien dépendent de la résonance morphique. Ils pourraient être fournis directement par les états conscients passés, à travers l'espace et le temps, sur la simple base de la similitude avec les états présents. Ce processus ressemblerait à la résonance morphique mais il en différerait en ce sens qu'il ne dépendrait pas d'états physiques mais d'états conscients. Il y aurait ainsi *deux* types de mémoire à long terme : la mémoire motrice ou mémoire habituelle induite par la résonance morphique, et la mémoire consciente déterminée par un accès direct du soi conscient à ses propres états passés. (8)

Une fois qu'on admet que le soi conscient possède des propriétés différentes de celles d'un système purement physique, il semble possible que certaines de ces propriétés puissent expliquer les phénomènes

nes parapsychologiques par ailleurs inexplicables en termes de causalité formative ou énergétique. (9)

Mais attendu que le soi possède des propriétés qui lui sont propres, comment agit-il sur le corps et sur le monde externe via les champs moteurs ? Il semble qu'il dispose de deux moyens d'y parvenir : premièrement, en sélectionnant entre différents champs moteurs possibles, faisant qu'un mode d'action soit adopté plutôt qu'un autre, et deuxièmement, en servant d'action créatrice à travers laquelle de nouveaux champs moteurs apparaîtront, par exemple dans l'apprentissage « intuitif » (cf Section 10.4). Il agirait dans les deux cas comme une cause formative, qui serait dans ses propres limites libre et indéterminée du point de vue de la causalité physique. On pourrait en fait la considérer comme une cause formative de causes formatives.

Selon cette interprétation, les actions consciemment contrôlées dépendent de *trois* sortes de causalité : la causalité consciente, la causalité formative et la causalité énergétique. En revanche, les théories interactionnistes traditionnelles, du type du « fantôme dans la machine », n'en admettent que deux : la causalité consciente et la causalité énergétique, et elles excluent la causalité formative. Le matérialisme modifié en admet deux, la causalité formative et la causalité énergétique, et il nie l'existence de la causalité consciente. Le matérialisme conventionnel n'en admet qu'une, la causalité énergétique. (10)

La relation entre la causalité consciente et la causalité formative est probablement plus compréhensible par analogie avec la relation existant entre la causalité formative et la causalité énergétique. La causalité formative n'écarte pas ou ne contrarie pas la causalité énergétique, mais elle impose un modèle aux événements qui sont indéterminés d'un point de vue énergétique ; elle sélectionne entre des possibilités énergétiques. De la même manière la causalité consciente n'écarte pas ou ne contrarie pas la causalité formative, mais elle sélectionne entre des champs moteurs qui sont également possibles en se fondant sur la résonance morphique.

Des situations dans lesquelles plusieurs modèles différents d'activité sont possibles se présentent soit quand le comportement sous l'influence de champs moteurs particuliers n'est pas encore canalisé par des chréodes habituelles ou innées, soit quand deux ou plusieurs champs moteurs sont en compétition pour contrôler le corps.

Chez les animaux inférieurs, la forte canalisation des modèles ins-

tinctifs de comportement laisse probablement peu voire pas de place à la causalité consciente ; mais chez les animaux supérieurs, la canalisation innée relativement faible du comportement de l'appétence peut fournir une étendue restreinte. Et chez l'homme, l'éventail gigantesque des actions possibles engendre nombre de situations ambiguës dans lesquelles on peut faire des libres choix conscients à la fois à des niveaux inférieurs, entre les méthodes permettant d'atteindre des objectifs fixés au préalable par les champs moteurs majeurs, et au niveau supérieur, entre des champs moteurs majeurs en compétition.

Selon cette opinion, la conscience est d'abord dirigée vers le choix entre des actions possibles, et son évolution a été intimement liée à l'augmentation de l'étendue de la causalité consciente.

Lors d'un premier stade de l'évolution humaine, cette étendue doit avoir énormément augmenté avec le développement du langage, à la fois de manière directe par la capacité à produire un nombre indéfini de modèles de sons dans la formulation des expressions et des phrases, et de manière indirecte par toutes ces actions rendues possibles par ces moyens souples et détaillés de communication : en outre, dans le développement associé de la pensée conceptuelle, le soi conscient doit à un certain stade, dans un saut qualitatif, être devenu conscient de lui-même en tant qu'agent de la causalité consciente.

Bien que la créativité consciente atteigne son plus haut développement dans l'espèce humaine, elle joue probablement aussi un rôle important dans le développement des nouveaux modèles de comportement chez les animaux supérieurs, et elle peut même être de quelque importance chez les animaux inférieurs. Mais la causalité consciente n'intervient que dans des cadres déjà établis de causalité formative donnés par la résonance morphique des animaux passés ; elle n'explique pas les champs moteurs majeurs dans le contexte desquels elle s'exprime, pas plus qu'elle ne peut être considérée comme une cause de la forme caractéristique de l'espèce. Elle aide encore moins à expliquer l'origine des formes nouvelles dans le règne végétal. Ainsi le problème de la créativité évolutive demeure-t-il irrésolu.

Cette créativité peut être attribuée soit à une action créative non physique qui transcende les organismes individuels, soit au hasard.

L'adoption de cette dernière alternative nous fournit la seconde des positions métaphysiques compatibles avec l'hypothèse de la causalité formative, dans laquelle la réalité du soi conscient en tant

qu'agent causal est admise, mais l'existence d'une action non physique transcendant les organismes individuels est niée.

12.4. L'univers créatif

Bien qu'une action créative capable d'engendrer de nouvelles formes et de nouveaux modèles de comportement au cours de l'évolution transcenderait nécessairement les organismes individuels, elle n'aurait pas besoin de transcender toute la nature. Elle pourrait être immanente à la vie en tant que tout ; dans ce cas elle correspondrait à ce que Bergson a nommé l'*élan vital**. Ou elle pourrait être immanente à la planète en tant que tout, ou au système solaire, ou à l'univers. Il pourrait y avoir une hiérarchie de créativités immanentes à tous ces niveaux.

De telles actions créatives engendreraient de nouveaux champs morphogénétiques et de nouveaux champs moteurs par une sorte de causalité semblable à la causalité consciente précédemment étudiée. En fait, si de telles actions créatives sont admises, il est alors difficile d'éviter de conclure qu'elles doivent d'une certaine façon être des soi conscients.

Si une telle hiérarchie de soi conscients existe, ceux de niveaux supérieurs pourraient alors exprimer leur créativité à travers ceux de niveaux inférieurs. Et si une telle action créative de niveau supérieur agissait à travers la conscience humaine, les pensées et les actions auxquelles elle donnerait naissance pourraient réellement être perçues comme provenant d'une source externe. Cette expérience d'*inspiration* est en fait bien connue.

En outre, si de tels « soi supérieurs » sont immanents à la nature, il est alors concevable qu'en certaines conditions les êtres humains puissent prendre directement conscience du fait qu'ils sont inclus en eux. Et en fait l'expérience d'une unité interne avec la vie, avec la terre ou avec l'univers, a été souvent décrite dans la mesure où ceci est exprimable.

Bien qu'une hiérarchie immanente de soi conscients puisse expliquer la créativité évolutionnaire dans l'univers, il est impossible qu'elle ait engendré l'univers en premier lieu. Cette créativité immanente ne peut pas non plus être dotée d'objectifs s'il n'y a rien au-delà de l'univers vers lequel elle puisse tendre. Ainsi, la totalité de la

* En français dans le texte. N.d.T.

nature évoluerait continuellement mais aveuglément et sans orientation.

Cette position métaphysique admet l'efficacité causale du soi conscient *et* l'existence d'actions créatives transcendant les organismes individuels, mais immanentes à la nature. Cependant elle rejette l'existence d'une action créative ultime transcendant l'univers en tant que tout.

12.5. La réalité transcendante

L'univers en tant que tout ne pourrait avoir une cause et un objectif que s'il avait été lui-même créé par un agent conscient le transcendant. A l'inverse de l'univers, cette conscience transcendante ne se développerait pas vers un objectif ; elle serait son propre objectif. Elle ne tendrait pas vers une forme finale ; elle serait complète en elle-même

Si cet être conscient transcendant était la source de l'univers et de tout ce qu'il renferme, toutes les choses créées participeraient en un certain sens à sa nature. La « globalité » plus ou moins limitée des organismes à tous les niveaux de complexité pourrait alors être considérée comme un reflet de l'unité transcendante de laquelle ils dépendaient et desquelles ils étaient en définitive issus.

Ainsi cette quatrième position métaphysique affirme-t-elle l'efficacité causale du soi conscient, *et* l'existence d'une hiérarchie d'actions créatives immanentes à la nature, *ainsi que* la réalité d'une source transcendante de l'univers.

NOTES

(1) Certaines versions modernes de la philosophie du matérialisme dialectique fourniraient probablement un bon point de départ au développement d'un matérialisme modifié en ce sens. Elles incluent déjà nombre d'aspects de l'approche organismique, et se fondent sur l'idée voulant que la réalité est évolutive de manière inhérente. (Graham, 1972)

(2) Pour une relation historique et une discussion critique des diverses théories matérialistes, voir les chapitres rédigés par Sir Karl Popper *in* Popper et Eccles (1977).

(3) L'hypothèse voulant que la mémoire et la télépathie soient explicables en fonction d'un nouveau type de « résonance » transtemporelle et transspaciale entre des organismes complexes semblables a en fait déjà été avancée par Marshall (1960) ; sa suggestion anticipait à maints égards importants l'idée de la résonance morphique.

(4) Bien qu'on puisse concevoir que la télépathie et la psychokinèse soient explicables en

fonction de la causalité formative, il est difficile de voir comment cette hypothèse aiderait à expliquer certains autres phénomènes, tels que la clairvoyance, qui semblent poser d'insurmontables problèmes à toute théorie physique. Pour un aperçu des différentes théories, physiques ou non physiques, ayant été avancées pour expliquer des phénomènes parapsychologiques, voir Rao (1977).

(5) Ryle (1949).

(6) E.G. Eddington (1935) ; Eccles (1953) ; Walker (1975).

(7) Jouvett (1967).

(8) Voir Bergson pour une discussion de la distinction entre mémoire motrice ou habituelle et mémoire consciente.

(9) Voir Rao (1977).

(10) Deux types différents de théorie dualiste ou vitaliste sont reconnaissables à la lumière de cette classification. Le premier, illustré dans les écrits de Driesch (1908, 1927), postule l'existence d'un nouveau type de causalité responsable des processus biologiques répétitifs et réguliers correspondant à la causalité formative dans le sens présent. Le second, développé le plus brillamment par Bergson, insiste d'une part sur la causalité consciente (*Matière et Mémoire*) et d'autre part sur la créativité évolutive (*L'évolution créatrice*), ni l'une ni l'autre ne peuvent être expliquées en termes de causes physiques.

(11) Bergson (1907).

RÉFÉRENCES

- AGAR, W.E., DRUMMOND, F.H. et TIEGS, O.W. (1942) Second rapport sur une vérification de l'expérimentation lamarckienne de McDougall sur l'entraînement des rats. *Journal of Experimental Biology* 19, 158-167.
- AGAR, W.E., DRUMMOND, F.H., TIEGS, O.W. et GUNSON, N.M. (1954) quatrième (et dernier) rapport sur une vérification de l'expérimentation lamarckienne de McDougall sur l'entraînement des rats. *Journal of Experimental Biology* 31, 307-321.
- ANFENSEN, C.B. (1973) Principes gouvernant l'enroulement des chaînes protéiques, *Science* 181, 223-230.
- ANFENSEN, C.B. et SCHERAGA, H.A. (1975) Aspects expérimentaux et théoriques de l'enroulement des protéines. *Advances in Protein Chemistry* 29, 205-300.
- ASHBY, R.H. (1972) *The Guidebook for the Study of Psychical Research*. Rider, Londres.
- AUDUS, L.J. (1979) Plant geosensor. *Journal of Experimental Botany* 30, 1051-1073.
- AYALA, F.J. et DOBZANSKY, T. (1974) *Studies in the Philosophy of Biology*. Macmillan, Londres.
- BALDWIN, J.M. (1902) *Development and Evolution*. Macmillan, New York.
- BANKS, R.D., BLAKE, C.C.F., EVANS, P.R., HASER, R., RICE, D.W., HARDY, G.W., MERRETT, M. et PHILLIPS, A.W. (1979) Séquence, structure et activité de la kinase. *Nature*, 279, 773-777.
- BELOFF, J. (1962) *The Existence of Mind*. MacGibbon & Kee, Londres.
- BELOFF, J. (1980) La mémoire normale est-elle un phénomène « paranormal » ? *Theoria to theory* 14, 145-161.
- BENTLEY, W.A. et HUMPHREYS, W.J. (1962) *Snow Crystals*. Dover, New York.
- BENTRUP, F.W. (1979) Réception et transduction des stimuli mécaniques et électriques. In A. Pirson et M.H. Zimmermann : *Encyclopedia of Plant Physiology* New Series Vol. 7, pp. 42-70. Springer-Verlag, Berlin.

- BENZER, S. (1973) Dissection génétique du comportement. *Scientific American* 229 (6), 24-37.
- BERGSON, H. (1896) *Matière et Mémoire*. Presses Universitaires de France, Paris.
- BERGSON, H. (1907) *L'Évolution créatrice*. Presses Universitaires de France, Paris.
- BOHM, D. (1969) Quelques remarques sur la notion d'ordre. In : Waddington (Editeur) (1969).
- BOHM, D. *La Globalité et l'Ordre Impliqué*. A paraître aux Editions du Rocher.
- BONNER, J.T. (1958) *The Evolution of Development*. Cambridge University Press, Cambridge.
- BOSE, J.C. (1926) *The Nervous Mechanism of Plants*. Longmans, Green & Co., Londres.
- BOYCOTT, B.B., (1965) L'apprentissage chez les poulpes. *Scientific American* 212 (3), 42-50.
- BRENNER, S. (1973) La génétique du comportement. *British Medical Bulletin* 29, 269-271.
- BROADBENT, D.E. (1961) *Behaviour*. Eyre & Spottiswoode, Londres.
- BROWN, J.L. (1975) *The Evolution of Behaviour*. Norton, New York.
- BUNNING, E. (1973) *The Physiological Clock*. English Universities Press, Londres.
- BURGESS, J. & NORTHCOTE, D.H. (1968) La relation entre le réticule endoplasmique et l'aggrégation et la désaggrégation microtubulaires. *Planta* 80, 1-14.
- BURR, H.S. (1972) *Blueprint for Immortality*. Neville Spearman, Londres.
- BURSEN, H.A. (1978) *Dismantling the Memory Machine*. Reidel, Dordrecht.
- BUTLER, S. (1878) *La Vie et l'Habitude*. Editions de la Nouvelle Revue française.
- CARINGTON, W. (1945) *Telepathy*. Methuen, Londres.
- CLARKE, R. (1980) Deux hommes et leurs chiens. *New Scientist* 87, 303-304.
- CLOWES, F.A.L. (1961) *Apical Meristems*. Blackwell, Oxford.
- CREW, F.A.E. (1936) Une répétition de l'expérience lamarckienne de McDougall. *Journal of Genetics* 33, 61-101.
- CRICK, F.H.C. (1967) *Of Molecules and Men*. University of Washington Press, Seattle.
- CRICK, F.H.C. et LAWRENCE, P. (1975) Compartments and polyclones dans le développement des insectes. *Science* 189, 340-347.
- CRICK, F.H.C. et ORGEL, L. (1973) Directed panspermia. *Icarus* 10, 341-346.
- CURRY, G.M. (1968) Phototropism in : *Physiology of Plant Growth and development* (ed. M.B. Wilkins) McCraw-Hill, Londres.
- DARWIN, C. (1875) *De la variation des animaux et des plantes à l'état domestique*. C. Reinwald, Paris.

- DARWIN, C. (1880) *La Faculté motrice dans les plantes*. C. Reinwald, Paris.
- DARWIN, C. (1882) *Les Mouvements et les habitudes des plantes grimpan-tes*. C. Reinwald, Paris..
- DAWKINS, R. (1976) *The Selfish Gene*. Oxford University Press, Oxford.
- DILGER, W.C. (1962) Le comportement des psittacidés. *Scientific American* 206, 88-98.
- DOSTAL, R. (1967) *On Integration in Plants*. Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- DRIESCH, H. (1908, deuxième édition 1929) *Science and Philosophy of the Organism*. A & C. Black, Londres.
- DRIESCH, H. (1914) *History and Theory of Vitalism*, Macmillan, Londres.
- DRIESCH, H. (1927) *Mind and Body*, Metheun, Londres.
- DUNCAN, R. et WESTON-SMITH, M. (1977) *Encyclopedia of Ignorance*. Pergamon Press, Oxford.
- DUSTIN, P. (1978) *Microtubules*. Springer-Verlag, Berlin.
- ECCLES, J.C. (1953) *The Neurophysiological Basis of Mind*. Oxford Uni-versity Press, Oxford.
- ECKERT, R. (1972) Contrôle bioélectrique de l'activité ciliaire *Science* 176.
- EDDINGTON, A. (1935) *The Nature of Physical World*. Dent, Londres.
- EIGEN, M. et SCHUSTER, P. (1979) *The Hypercycle*. Springer-Verlag Heil-delberg et New York.
- ELSASSER, W.M. (1958) *Physical Foudations of Biology*. Pergamon Press, Londres.
- ELSASSER, W.M. (1966) *Atom and Organism*. Princeton University Press, Princeton.
- ELSASSER, W.M. (1975) *The Chief Abstractions of Biology*, North Hol-land, Amsterdam.
- EMMET, D. (1966) *Whitehead's Philosophy of Organism*. Macmillan, Londres.
- ESPAGNAT, B. d' (1965) *Conceptions de la physique contemporaine. Les interprétations de la mécanique quantique et de la mesure*. Hermann, Paris.
- FISHER, R.A. (1930) *Genetical Theory of Natural Selection*. Clarendon Press, Londres.
- GOEBEL, K. (1898) *Organographie der Pflanzen*, Fischer, Jena.
- GOLDSCHMIDT, R. (1940) *The Material Basis of Evolution*. Yale University Press, New Haven.
- GOODWIN, B.C. (1979) Des champs morphogénétiques. *Theoria to Theory*, 13, 109-114.
- GOULD, S.J. (1980) Le retour du monstre optimiste. In : *The Panda's Thumb*. Norton, New York.
- GRAHAM, L.A. (1972) *Science and Philosophy in the Soviet Union*. Knopf, New York.

- GURWITSCH, A. (1922) De la notion des champs embryonnaires. *Archiv für Entwicklungsmechanik*, 51, 383-415.
- HAKEN, H. (1977) *Synergetics*. Springer-Verlag, Berlin.
- HALDANE, J.B.S. (1939) La théorie de l'évolution de la dominance. *Journal of Genetics* 37, 365-374.
- HARAWAY, D.J. (1976) *Crystals, Fabrics and Fields*. Yale University Press, New Haven.
- HARDY, A. (1965) *The Living Stream*. Collins, Londres.
- HASTED, J.B. (1978) Spéculations quant à la relation entre les phénomènes psychiques et la physique. *Psychoenergetic Systems* 3, 243-257.
- HEBB, D.O. (1949) *The Organisation of Behavior*. Wiley, New York.
- HESSE, M.B. (1961) *Forces and Fields*. Nelson, Londres.
- HILEY, B.J. (1980) Vers une description algébrique de la réalité. *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, 5, 75-103.
- HINDE, R.A. (1966) *Animal Behavior*. McGraw-Hill, New York.
- HINGSTON, R.W.G. (1928) *Problems of Instinct and Intelligence*. Arnold, Londres.
- HOLDEN, A. et SINGER, P. (1961) *Crystals and Crystals Growing*. Heinemann, Londres.
- HOYLE, F. and WICKRAMASINGHE, C. (1978) *Lifecloud*. Dent Londres.
- HUXLEY, J. (1942) *Evolution : The Modern Synthesis*. Allen et Unwin, Londres.
- HUXLEY, T.H. (1867) *Hardwicke's Science Gossip* 3, 74.
- JAFFE, M.J. (1973) Thigmomorphogenese, *Planta* 114, 143-157.
- JENNINGS, H.S. (1906) *Behavior of the Lower Organisms*. Columbia University Press, New York.
- JENNY, H. (1967) *Cymatics*. Basileus Press, Bâle.
- JOUVET, M. (1967) Les états du sommeil. *Scientific American* 216 (2), 62-72.
- JUNG, C.G. (1959) *The Archetyps and the Collective Inconscious*, Routledge and Kegan Paul, London.
- KAMMERER, P. (1924) *The Inheritance of Acquired Characteristics*. Boni et Liveright, New York.
- KANDEL, E.R. (1979) Petits systèmes des neurones. *Scientific American* 241 (3), 61-71.
- KATZ, B. (1966) *Nerve, Muscle and Synapse*. McGraw-Hill, New York.
- KATZ, B. et MILEDI, R. (1970) Bruit de la membrane produit par l'acétylcholine. *Nature* 226, 962-963.
- KING, M.C. et WILSON, A.C. (1975) Evolution à deux niveaux chez les Humains et les chimpanzés. *Science* 188, 107-116.
- KOESTLER, A. (1967) *Le Cheval dans la locomotive. Le paradoxe humain*. Calmann-Lévy, Paris.
- KOESTLER, A. (1971) *L'Etreinte du crapaud*. Calmann-Lévy, Paris.
- KOESTLER, A. et SMYTHIES, J.R. (1969) *Beyond Reductionism*. Hutchinson, Londres.

- KOHLER, W. (1925) *The Mentality of Apes*. Harcourt Brace, New York.
- KRSTIC, R.V. (1979) *Ultrastructured of the Mammalian Cell*. Springer-Verlag, Berlin.
- KUHN, T.S. (1962) *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago University Press, Chicago.
- LASHLEY, K.S. (1950) A la recherche de l'engramme. *Symposia of the Society for Experimental Biology* 4, 454-482.
- LAWDEN, D.F. (1980) Interactions psychokinésiques possibles dans la théorie quantique. *Journal of the Society for Psychical Research* 50, 399-407.
- LECLERC, I. (1972) *The Nature of Physical Existence*. Allen et Unwin, Londres.
- LENARTOWICZ, P. (1975) *Phenotype-Genotype Dichotomy*. Université Grégorienne, Rome.
- LEWIS, E.B. (1963) Gènes et voies de développement. *American Zoologist*, 3 33-56.
- LEWIS, E.B. (1978) Un complexe de gènes contrôlant la segmentation chez la *Drosophila*. *Nature* 276, 565-570.
- LINDAUER, M. (1961) *Communication Among Social Bees*. Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- LOIZOS, C. (1967) Le comportement du jeu chez les primates supérieurs. in : *Primate Ethology* (Editeurs D. Morris). Weidenfeld et Nicolson, Londres.
- MACKIE, J.L. (1974) *The Cement of the Universe*. Oxford University Press, Oxford.
- MACKINNON, D.C. et HAWES, R.S.J. (1961) *An Introduction to the Study of Protozoa*. Oxford University Press, Oxford.
- MACWILLIAMS, H.K. et BONNER, T.J. (1979) The pretalk-prespore pattern in cellular slime moulds. *Differentiation*, 14, 1-22.
- MAHESHWARI, P. (1950) *An introduction to the Embryology of Angiosperms*. McGraw-Hill, New York.
- MANNING, A. (1975) La génétique du comportement et l'étude de l'évolution comportementale. In G.P. BAERENDS, C. BEER et A. MANNING : *Function and Evolution in Behaviour*. Oxford University Press, Oxford.
- MARAIS, E. (1971) *The Soul of the White Ant*. Cape et Blond, Londres.
- MARSHALL, N. (1960) PSI et mémoire : une théorie physique. *British Journal for the Philosophy of Science* 10, 265-286.
- MASTERS, M.T. (1869) *Vegetale Teratology*. Ray Society, Londres.
- MAYR, E. (1963) *Animal Species and Evolution*. Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- MCDUGALL, W. (1927), Une expérience pour la vérification de l'hypothèse lamarckienne. *British Journal of Psychology* 17, 267-304.
- MCDUGALL, W. (1938) Quatrième rapport sur une expérience lamarckienne. *British Journal of Psychology* 28, 321-345.
- MEDAWAR, P.B. (1968) *the Art of the Soluble*. Methuen, Londres.

- MEDVEDEV, Z.A. (1969) *The Rise and Fall of T.D. Lysenko*. Columbia University Press, New York.
- MEINHARDT, H. (1978) détermination de la cellule spatio-dépendante sous le contrôle d'un gradient morphogène. *Journal of Theoretical Biology* 74, 307-321.
- MONOD, J. (1970) *Le Hasard et la Nécessité*. Editions du Seuil. Collection « Points », Paris.
- MORATA, G. et LAWRENCE, P.A. (1977) Homoeotic gene, compartment and cell détermination in *Drosophila*. *Nature*, 265, 211-216.
- NEEDHAM, J. (1942) *Biochemistry and Morphogenesis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- NEMETHY, G. et SCHERAGA, H.A. (1977) Proteins folding *Quarterly Review of Biophysics* 10, 239-352.
- NICOLIS, G. et PRIGOGINE, I. (1977) *Self-Organization in Nonequilibrium Systems*. Wiley-Interscience, New York.
- PARSONS, P.A. (1967) *The Genetic Analysis of Behaviour*. Methuen, Londres.
- PAULING, L. (1960) *The Nature of Chemical Bond* (3^e édition) Cornell University Press, Ithaca.
- PEARSON, K. (1924) *Life of Francis Galton*. Cambridge University Press, Cambridge.
- PECHER, C. (1939) La fluctuation d'excitabilité de la fibre nerveuse. *Archives Internationales de Physiologie* 49, 129-152.
- PENZIG, O. (1921-1922) *Pflanzen-Teratologie*. Borntraeger, Berlin.
- PICKETT-HEAPS, J.D. (1969) L'évolution de l'appareil mitotique. *Cytobios*, 3, 257-280.
- PICKETT-HEAPS, J.D. (1975) *Green Algae*. Sinauer Associates, Sunderland, Mass.
- POLANYI, M. (1958) *Personal Knowledge*, Routledge et Kegan Paul, Londres.
- POPPER, K.R. (1965) *Conjectures and Refutations*. Routledge et Kegan Paul, Londres.
- POPPER, K.R. (1967) Mécanique quantique sans l'« observateur ». In : M. Bunge (Editeur) *Quantum Theory and Reality*. Springer-Verlag, Berlin.
- POPPER, K.R. et ECCLES, J.C. (1977) *The Self and its brain*. Springer International, Berlin.
- PRIBRAM, K.H. (1971) *Languages of the Brain*. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- RAO, K.R. (1977) De la nature du psy. *Journal of Parapsychology* 41, 294-351.
- RAPP, P.E. (1979) Un atlas des oscillations cellulaires. *Journal of Experimental Biology*, 81, 281-306.
- RAVEN, P.H., EVERT, R.F. et CURTIS, H. (1976) *Biology of Plants*. Worth Publishers, Inc. New York.
- RENSCH, B. (1959) *Evolution Above the Species Level*. Methuen, Londres.

- RHINE, J.B. et MCDUGALL, W. (1933) Troisième rapport sur une expérience lamarckienne. *British Journal of Psychology* 24, 213-235.
- RICARD, M. (1969) *The Mystery of Animal Migration*. Constable, Londres.
- RIEDL, R. (1978) *Order in Living Organisms*. Wiley Interscience, Chichester et New York.
- RIGNANO, E. (1926) *Biological Memory*. Harcourt Brace and Co., New York.
- ROBERTS, K. et HYAMS, J.S. (Editeurs) (1979) *Microtubules*. Academic Press, Londres.
- ROBLIN, G. (1979) *Mimosa pudica* : un modèle pour l'étude de l'excitabilité chez les végétaux. *Biological Reviews* 54, 135-153.
- RUSSEL, B. (1921) *Analysis of Mind*. Allen et Unwin, Londres.
- RUSSEL, E.S. (1945) *The Directiveness of Organic Activities*. Cambridge University Press, Cambridge.
- RUYSER, R. (1974) *La gnose de Princeton*, Fayard Paris.
- RYLE, G. (1949) *The Concept of Mind*. Hutchinson, Londres.
- SATTER, R.L. (1979) *Encyclopedia of Plant Physiology* (Editeurs A. Pirson et M.H. Zimmermann), Nouvelles Séries vol. 7, pp. 442-484. Springer-Verlag, Berlin.
- SCHOPENHAUER, A. (1819) *Le Monde comme volonté et comme représentation*, Livre I, Section 7. Presses universitaires de France, Paris.
- SEMON, R. (1912) *Das Problem der Vererbung Erworbenener Eigenschaften*. Engelmann, Leipzig.
- SEMON, R. (1921) *The Mneme*. Allen et Unwin, Londres.
- SERRA, J.A. (1966) *Modern Genetics* Vol. 2, pp. 269-270. Academic Press, Londres.
- SHELDRAKE, A.R. (1973) La production d'hormones chez les végétaux supérieurs. *Biological Reviews*, 48, 509-559.
- SHELDRAKE, A.R. (1974) Le vieillissement, la croissance et la mort des cellules. *Nature*, 250, 381-385.
- SHELDRAKE, A.R. (1980 a) Trois approches de la biologie. I. La théorie mécaniste de la vie. *Theoria to Theory* 14, 125-144.
- SHELDRAKE, A.R. (1980 b) Trois approches de la biologie. II. Vitalisme. *Theoria to Theory*. 14, 227-240.
- SHELDRAKE, A.R. (1981) Trois approches de la biologie. III. Organicisme. *Theoria to Theory* 14, 301-311.
- SIEGELMAN, H.W. (1968) Phytochrome. In : *Physiology of Plant Growth and Development* (éditeurs M.B. Wilkins). Mc-Graw-Hill, Londres.
- SINNOTT, E.W. (1963) *The Problem of Organic Form*. Yale University Press, New Haven.
- SKINNER, B.F. (1938) *The Behavior of Organisms*. Appleton Century, New York.
- SLEIGH, M.A. (1968) Coordination du rythme de battement chez certains systèmes ciliaires. *International Review of Cytology* 25, 31-54.
- SNOAD, B. (1974) *Euphytica* 23, 257-265.

- SPEAR, N.E. (1978) *The Processing of Memories*. Lawrence Erlbaum, Associates, Hillsdale, N.J.
- STEBBINS, G.L. (1974) *Flowering Plants : Evolution above the Species Level*. Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- STEVENS, C.F. (1977) Etude des modifications de perméabilité d'une membrane par l'analyse de la fluctuation. *Nature* 270, 391-396.
- STREET, H.E. et HENSHAW, G.G. (1965) Introduction et méthodes employées dans la culture des tissus végétaux. In : *Cellssand Tissues in Culture* (Editeurs E.N. Willmer) Vol. 3, pp. 459-532. Academic Press, Londres.
- SUPPES, P. (1970) *A probabilistic Theory of Causality*. North Holland, Amsterdam.
- TAYLOR, J.G. et BALANOVSKI, E. (1979) Existe-t-il une explication scientifique du paranormal ? *Nature* 279, 631-633.
- TEILHARD de CHARDIN, Pierre (1959) *Le Phénomène humain*, Le Seuil, Paris.
- THOM, R. (1972) *Stabilité structurelle et morphogénèse*. Benjamin Reading, Mass.
- THOM, R. (1975) D'un modèle de la science à une science des modèles. *Synthèse* 31, 359-374.
- THOM, R. (1980) *Modèles mathématiques de la morphogénèse*. Christian Bourgois éditeur, Paris.
- THOMPSON d'ARCY, W. (1942) *On Growth and Form*. Cambridge University Press, Cambridge.
- THORPE, W.H. (1963) *Learning and Instinct in Animals* (2^e édition) Methuen, Londres.
- THORPE, W.H. (1978) *Purpose in a World of Chance*. Oxford University Press, Oxford.
- THOULESS, R.H. (1972) *From Anecdote to Experiment in Psychical Research*. Routledge et Kegan Paul, Londres.
- TINBERGEN, N. (1951) *The Study of Instinct*. Oxford University Press, Oxford.
- VERVEEN, A.A. et DE FELICE, L.J. (1974) Bruit de la membrane. *Progress in biophysics and Molecular Biology* 28, 189-265.
- VON BERTALANFFY, L. (1933) *Modern Theories of Development*. Oxford University Press, Londres.
- VON BERTALANFFY, L. (1971) *General Systems Theory*. Allen Lane, Londres.
- VON FRISCH, K. (1975) *Animal Architecture*. Hutchinson, Londres.
- WADDINGTON, C.H. (1957) *The Strategy of the Genes*. Allen et Unwin, Londres.
- WADDINGTON, C.H. (1969) *Towards a theoretical Biology. 2. Sketches*. Edinburgh University Press, Edimbourg.
- WALKER, E.H. (1975) Fondements des phénomènes paraphysiques et

- parapsychologiques. In : *Quantum Physics and Parapsychology* (Editeur L. Otera) Parapsychology Foundation, New York.
- WARDLAW, C.W. (1965) *Organization and Evolution in Plants*. Longmans, Londres.
- WATSON, J.B. (1924) *Behaviorism*. Chicago University Press, Chicago.
- WEISS, P. (1939) *Principles of Development*. Holt, New York.
- WHITEHEAD, A.N. (1928) *Science and the Modern World*. Cambridge University Press, Cambridge.
- WHITEMAN, J.H.M. (1977) Parapsychologie et Physique. In WOLMAN, *Handbook of Parapsychology* (1977).
- WHYTE, L.L. (1949) *The Unitary Principle in Physics and Biology*. Cresset Press, Londres.
- WIGGLESWORTH, V.B. (1964) *The Life of Insects*. Weidenfeld et Nicolson, Londres.
- WIGNER, E. (1961) Remarques sur la question de l'esprit et du corps. In : *The Scientist Speculates* (Editeur I.J. Good) Heinemann, Londres.
- WIGNER, E. (1969) Epistémologie en physique quantique. In : *Contemporary Physics : Trieste Symposium 1968*. Vol. 2 pp. 431-438. International Atomic Energy Authority, Vienne.
- WILLIAMS, R.J.P. (1979) Les propriétés de conformité des protéines en solution. *Biological Review* 54, 389-437.
- WILLIS, J.C. (1940) *The Course of Evolution* Cambridge University Press, Cambridge.
- WILLMER, E.N. (1970) *Cytology and Evolution*. (2^e édition) Academic Press, Londres.
- WILSON, E.O. (1975) *Sociobiology : The New Synthesis*. Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- WOLFF, G. (1902) *Mechanismus and Vitalismus*, Leipzig.
- WOLMAN, B.B. (1977) *Handbook of Parapsychology*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- WOLPERT, L. (1978) Formation du modèle dans le développement biologique. *Scientific American* 239, (4) 154-164.
- WOODGER, J.H. (1929) *Biological Principles*. Kegan Paul, Trench, Trubner & Co., Londres.

Rupert Sheldrake

Une nouvelle science de la vie

L'hypothèse de la causalité formative

Traduit de l'anglais par Paul Couturiau, Christel Rollinat et Christian Supera

Quelle est la nature de la vie ? Comment les formes et les instincts des êtres vivants sont-ils déterminés ? Une nouvelle science de la vie suggère des réponses originales et révolutionnaires à ces questions éternelles. À la différence de la conception mécaniste du monde qui postule l'existence de lois immuables, Sheldrake propose en effet une approche organiciste ou évolutive de la nature.

Il porte à la connaissance du public une série d'expériences tout à fait surprenantes qui remettent en cause les certitudes des biologistes : si un animal, tel un rat de laboratoire, apprend un nouveau type de comportement, les rats suivants apprendront plus facilement le même type de comportement. Et si de nombreux rats sont entraînés à réaliser une tâche nouvelle dans un laboratoire de Londres, leurs congénères, dans d'autres endroits du monde, feront de même. Il se produit dans le règne animal, comme dans le règne végétal ou humain, une transmission de l'information qui échappe aux paramètres connus et semble se jouer de l'espace et du temps.

Rupert Sheldrake a compris que l'heure d'une nouvelle biologie avait sonné. Son hypothèse dite de « la causalité formative » qui fait intervenir la présence d'un soi conscient et d'une mémoire créative immanente à l'univers reconsidère les problèmes de l'évolution, de l'origine de la vie, de la morphogénèse, de l'hérédité et de l'instinct.

Titulaire d'un doctorat en sciences naturelles de l'université de Cambridge, Rupert Sheldrake est chercheur à l'Institut des sciences noétiques de Californie. Il s'est fait mondialement connaître grâce à ses théories novatrices sur la « causalité formative » et les « champs morphogénétiques ». Il a publié quatre autres livres aux éditions du Rocher : La Mémoire de l'univers, L'Âme de la nature, Sept expériences qui peuvent changer le monde et Ces chiens qui attendent leur maître et autres pouvoirs inexplicables des animaux.

Imprimé en France S.M.G.M.H. - VAN LEE. Courty

979 820 9 18,50 €

ISBN 2 268 04805 5 9

