

Thermodynamique des émergences

A la suite de mes recherches sur les phénomènes de transitions de phases, et l'examen des innombrables travaux sur les phénomènes dits émergents, je suis arrivé aux conclusions simples ci-après :

Les recherches et les prises de positions sur « l'émergence » ont animé la communauté scientifique durant un siècle, jusqu'à 1980 environ, date de l'arrivée en force des calculateurs. Pendant cette période, les tenants de l'émergence comme avènements de propriétés irréductiblement nouvelles se sont heurtés aux rationalistes, à tendance physicalistes. D'une manière générale, et en écartant même les positions idéologiques concernant la nature de la vie, beaucoup de scientifiques, devant l'inextricable complexité des phénomènes biologiques qui avait à leurs yeux pour conséquence l'irréductibilité de la biologie à la physique, attendaient que la science découvre des lois spécifiques à la biologie. C'est ce qu'affirmait Schrödinger* dans son ouvrage « What is Life », écrit en 1944-45.

Tout au long du 20^{ème} siècle, ce sujet a divisé les savants.

Depuis 1980, les modélisations que permettent le développement fulgurant des ordinateurs ont considérablement étendu le champ de la représentation et de l'explication des phénomènes complexes, si bien qu'aujourd'hui, on ne voit pas de limite à cette extension qui de près ou de loin, vise à insérer tous les phénomènes macroscopiques dans le champ de la physique statistique.

La physique quantique a défini le socle sur lequel s'articulent désormais les développements de la physique la thermodynamique réalisant le lien entre le domaine quantique et le macroscopique. En effet, tout phénomène étant le siège d'un échange d'énergie, c'est fondamentalement la thermodynamique, science de l'énergie, qui régit nos représentations des phénomènes naturels.

Les révolutions de la physique

La physique classique s'est fondée sur l'analyse des régularités que nous présentent les phénomènes naturels.

Cette approche établit des relations de proportionnalité entre des caractéristiques que nous détectons, et ces relations s'expriment par des lois linéaires. Cette méthode d'induction, introduite par Bacon et Descartes, a guidé la science jusqu'au 19^{ème} siècle.

Au milieu du 19^{ème} siècle, une première révolution a créé la thermodynamique. C'est une révolution pour les raisons suivantes :

- La thermodynamique s'intéresse aux échanges d'énergie, alors que la physique classique ne s'intéressait qu'aux relations entre corps matériels (mécanique rationnelle), à la géométrie de la lumière (optique) et aux flux d'électrons (électricité statique et débuts de l'électrodynamique).
- Elle fait appel à des outils mathématiques nouveaux tels que les développements des équations différentielles aux dérivées partielles et les séries de Fourier.
- Enfin et surtout, elle introduit une notion bouleversante, celle d'entropie, avec le deuxième principe posé par Carnot (réflexions sur la puissance motrice du feu) et pleinement développé par Clausius. Ce principe introduit une orientation du monde vers le désordre.

A la fin du 19^{ème} siècle, Maxwell, puis surtout Boltzmann, faisant l'hypothèse très hardie de l'existence d'atomes (l'idée était dans l'air, mais les preuves expérimentales ne sont arrivées qu'au début du 20^{ème} siècle, après le suicide de Boltzmann, plongé dans la mélancolie par l'indifférence de ses collègues).

La « mécanique statistique de Boltzmann faisait le pont entre la thermodynamique de Clausius et l'interprétation des états microscopiques des gaz parfaits à l'équilibre. Ce n'était qu'une petite partie d'un programme qui allait se développer tout au long du 20^{ème} siècle, mais c'était un pas de géant du point de vue méthodologique et épistémologique.

Il a entraîné l'extension de la nouvelle science, dite physique statistique, à tous les domaines de la recherche sur les milieux macroscopiques.

La physique statistique a désormais trois branches principales, qui sont fondamentalement raccordées à la physique quantique :

- 1 - La physique des phases, qui concerne les comportements des milieux homogènes, dans leurs divers états, relations entre états, surfaces limites : gaz, liquides, solides, plasma, flux d'électrons...
- 2 - Les relations entre phases, qui englobent les phénomènes chimiques (au plan macroscopique, car au niveau atomique, il s'agit de phénomènes quantiques ; voir plus loin : liaisons électroniques), et toutes les interactions entre phases, (interpénétrations, diffusions, percolations) qui donnent très généralement lieu à des représentations fractales,
- 3 - Et enfin, les phénomènes de structuration, qui se divisent en deux grandes catégories, les cristallisations, '(agencements réguliers de molécules, dans un sens très large (y compris membranes, mousses, cristaux liquides...) , et les structurations complexes, qui sont typiquement celles des structures vivantes.

La troisième révolution est celle de la physique quantique. Cette dernière, en établissant des règles fondamentales pour décrire les événements du monde des particules

élémentaires désormais décrites par le « modèle standard », a donné à la thermodynamique ses bases élémentaires.

Tous les phénomènes naturels, évènements quantiques ponctuels ou processus dynamiques sont le siège d'échanges d'énergie, et ils relèvent de l'étude thermodynamique.

La thermodynamique est dès lors le socle sur lequel repose toute connaissance scientifique des milieux naturels.

Les électrons, acteurs des échanges énergétiques

Tous ces phénomènes, à l'exception des réactions nucléaires et de la radioactivité, mettent en jeu des électrons dans des changements d'états quantiques.

La physique a analysé une grande variété de ces phénomènes électroniques qui vont de la covalence et électrovalence chimiques aux forces électroniques de cohésion, de la matière condensée, aux liaisons ioniques, aux forces de Van der Waals et similaires. Toutes ces forces correspondent à l'absorption ou à l'émission d'un quantum d'énergie (photon) par un électron qui change d'état quantique ; La physique macroscopique étant en principe réductible à ces interactions électroniques, j'en donne une présentation globale mais succincte en annexe.

Les systèmes complexes : leurs défis

La physique statistique a abordé avec grand succès l'élucidation (représentation descriptive et explicative, voire prédictive) de tous les phénomènes macroscopiques. Elle a donc élucidé les problèmes concernant les phases et les relations entre phases.

Mais la dynamique des systèmes complexes exige une approche beaucoup plus difficile que celle des phases ou de leurs interpénétrations, et pour plusieurs raisons ;

1 -Les formulations non linéaires qu'elles appellent n'ont pas encore inventé tous les outils mathématiques adéquats. Cependant, l'approche de ces problèmes a été facilitée par l'arrivée des ordinateurs et leur fulgurante montée en puissance. Le dialogue entre le chercheur et l'ordinateur permet au premier de tester quasi instantanément la validité d'un modèle ; d'autre part, le travail séquentiel de l'ordinateur a suggéré la mise en œuvre de fonctions itératives, et dans ce domaine, des fonctions quadratiques ont été inventées avec profit. Mandelbrot, qui a créé la notion de fractales, a développé ces outils mathématiques avec une méthodologie que je n'hésite pas à qualifier de « mathématiques expérimentales ».

2 - La complexité des phénomènes suggère des modèles dont nous ne savons pas toujours définir les variables et paramètres pertinents. Pour y voir clair, on doit faire des choix de paramètres et variables « les plus pertinentes », et opérer par approches successives, ce qui ne présente d'ailleurs que des avantages.

3 - Enfin, les phénomènes de structuration créent de l'ordre, ce qui a pu être considéré comme une négation du 2^{ème} principe de la thermodynamique, et on a parfois prononcé le mot « néguentropie ». Mais, de même que l'électron ne peut provoquer des événements que s'il échange des photons avec son environnement, de même, la « néguentropie d'un système ne peut advenir que si son environnement lui cède de l'énergie, c'est-à-dire compense par un accroissement d'entropie au moins égal à la diminution correspondant à la création d'ordre.

Ces diverses avancées sont actuellement dans une phase d'accélération, si bien qu'on ne peut plus fixer de limite aux capacités de représentations descriptives et explicatives des phénomènes complexes, si complexes soient-ils.

La thermodynamique est au cœur de tous les phénomènes

Le sujet de ce colloque est donc sans doute le plus fondamental.

Parmi les auteurs qui ont apporté des éléments décisifs dans ces domaines, je donne en références Balian, Mandelbrot*, Kolmogorov*, Gell Mann*, Holland*, Noble*.

Quelques exemples pour illustrer cette présentation

Je vais, pour justifier cet exposé général mais beaucoup trop laconique, donner cinq exemples, - parmi tant d'autres -, qui ont pu susciter la perplexité, le goût du mystère et aussi des oppositions radicales a priori.

Les oppositions à ces projets, souvent qualifiées avec mépris de réductionnistes, ont été de plusieurs ordres :

- Des phénomènes jugés paradoxaux défiaient les schémas intellectuels éprouvés par l'expérience.
- L'extrême complexité des phénomènes et le nombre très élevé, et souvent difficile à fixer, des variables semblait interdire tout projet d'analyse et de description.

- Des concepts à priori, -« l'élan vital » fut coriace -, s'opposaient à une approche classique des phénomènes.
- Des théologies et les mouvances créationnistes se sont opposées aux conclusions tirées des investigations paléontologiques et aux résultats d'observation que Darwin avait condensés dans sa théorie de l'évolution.

Le premier concerne un de ces innombrables cas où la nature nous offre des comportements paradoxaux : j'ai choisi l'exemple de la densité de l'eau.

Le deuxième concerne un cas de morphogenèse. Si j'ai choisi un système physique et non biologique, c'est parce que ce système présente des résultats expérimentaux très variés, avec des bifurcations entre des états chaotiques et des régularités très stables dans certaines limites de valeurs des paramètres caractéristiques du système. Il s'agit des rouleaux de Bénard. Les modèles de représentation de ces phénomènes nous suggèrent un principe de modélisation de toute morphogenèse ou embryogenèse que J. Holland a été le premier à formuler.

Les trois derniers cas concernent des phénomènes adaptatifs. Par cette expression, il faut entendre les passages d'un état de stabilité (dynamique) à un autre état, par la modification des processus de relations entre un système et son environnement, ou même des modifications de structure du système le rendant apte à retrouver une stabilité dans un changement d'environnement. Ces phénomènes adaptatifs correspondent à la conception darwinienne de l'évolution. Les modifications évolutives se sont produites, certainement, au cours de 'évolution, - qui est une histoire -, sur des périodes très longues par rapport à notre « temps » de la durée de vie humaine. Mais certains cas d'évolution peuvent se produire très rapidement si, dans une espèce, des variétés coexistent et que les circonstances favorisent l'une ou l'autre. J'ai choisi l'exemple des papillons des crassiers. Pour illustrer les modalités de l'évolution adaptative, je présenterai un cas de régulation complexe : un phénomène d'adaptation permanente aux variations incessantes du milieu : il s'agit de la régulation thermique des animaux à sang chaud. Ici on est dans les échanges de chaleur (donc d'énergie) entre le système et son environnement. Cette présentation, qui nous offre tous les aspects d'un plan mûrement établi, me donnera l'occasion d'évoquer la démarche d'ingénieur en regard des longues gestations naturelles

Je terminerai par la phylogenèse de la vision. Darwin était hanté par l'extraordinaire complexité de l'oeil et il ne pouvait pas imaginer un processus progressif qui puisse le produire.

Mais les paléontologues et les embryologistes ont découvert le schéma commun de l'évolution naturelle et sa récapitulation extraordinaire dans l'embryogenèse. Et je conclurai sur ce point.

Notons que nous ne pourrions pas entrer dans l'ultime détail de ces phénomènes, Ce serait inutile puisque les observations macroscopiques ne sont que le résultat de l'ensemble des phénomènes microscopiques. J'ai rappelé plus haut que tout phénomène énergétique entre

atomes ou molécules (en excluant les phénomènes de radioactivité), concernaient toujours une transition d'état quantique d'un ou plusieurs électrons.

L'énergie du vivant : J'ajoute, parce que c'est un phénomène assez peu connu, que les échanges énergétiques du vivant sont presque exclusivement le résultat d'une modification chimique de l'adénosine, c'est adire d'un changement d'état quantique d'un électron qui permet le passage, dans les deux sens, d'un ATP (adénosine triphosphate) à un ADP (adénosine diphosphate) et réciproquement. Il s'agit de la perte d'un ion phosphate par l'adénosine triphosphate (qui devient diphosphate en libérant un quantum d'énergie), et de l'absorption d'un photon par l'ADP qui lui permet d'acquérir un ion phosphate et de restituer ainsi à l'organisme un potentiel énergétique. Pour plus d'ampleur sur ce sujet, voir l'admirable de Duve* .

1 - Le cas de l'eau.

L'eau est un corps qui possède des propriétés très originales et que la physique a tardé à expliquer.

Aujourd'hui, tous les mystères de l'eau sont dévoilés (et la mauvaise blague de la mémoire de l'eau est oublié).

Je vais évoquer la bizarrerie de la densité de l'eau autour de la zone de 0 à 4 ° C (exactement 3, 94)

L'anomalie apparente est la suivante :

La température est strictement « l'état d'agitation des molécules ».

Quand cet état diminue, la distance moyenne entre molécules diminue, et la densité augmente.

Avec l'eau, entre 3, 94 ° et 0 °, c'est le contraire que l'on constate.

Et, à la formation de la glace, la densité tombe à 0,91.

Que se passe-t-il ?

La molécule d'eau est un complexe de deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène. Ce corps se forme parce que l'oxygène a une « couche électronique externe non saturée » à 6 électrons. Les deux atomes d'hydrogène (chacun fait d'un proton et un électron) fournissent les deux électrons qui « complètent la couche électronique de l'oxygène. Dès lors, la molécule d'eau se comporte comme un atome d'oxygène « surchargé de deux charges électroniques négatives, et de deux protons, chacun chargé d'une charge positive.

La molécule a un comportement bipolaire qui favorise les associations électriques avec d'autres molécules : des molécules de sels, que l'eau « dissout » en formant des

associations avec chacun des deux ions (c'est l'origine de la capacité de solvant de l'eau), et aussi de l'association des molécules d'eau entre elles

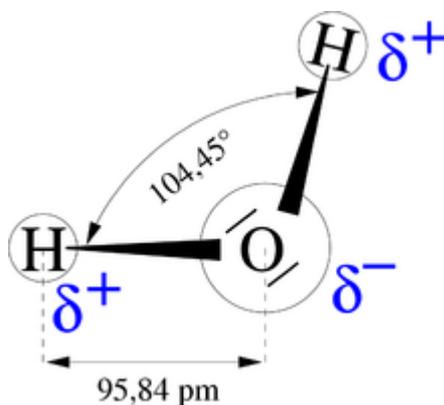


Fig 1 :Schéma de la molécule d'eau. Source : Techno-Science.net

Pour l'eau, les liens entre molécules sont appelés liaisons hydrogène, mais il faut les comprendre de la manière suivante : le nuage électronique est largement concentré sur le noyau d'oxygène, et il suffit à enserrer les deux protons pour les rapprocher du noyau d'oxygène, mais à une distance qui est limitée par la force répulsive qui s'exerce entre les protons (ceux de l'atome d'oxygène et les deux hydrogènes). L'équilibre de l'ensemble forme un triangle d'un angle de 104° au sommet « oxygène » cette configuration compose un objet comportant un pôle négatif (double) au noyau d'oxygène et deux pôles positifs aux deux protons « hydrogène ».

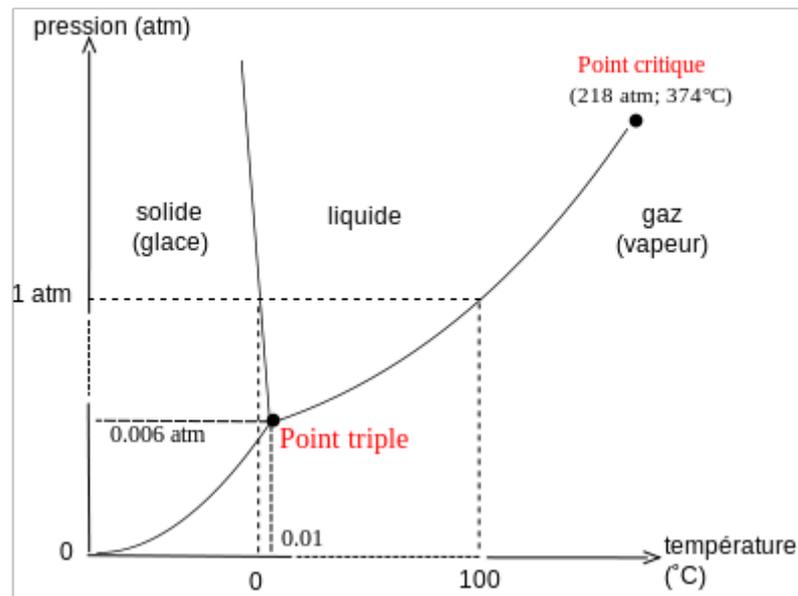


Fig 2 : Diagramme «température-pression ces états de l'eau, point de bifurcation (point triple) , point critique. Source Techno-Science.net

L'attraction « positif-négatif » conduit les molécules d'eau à s'associer par couplages des hydrogènes (protons) aux oxygènes (couche électronique du noyau d'oxygène doublement négative).

Cette configuration conduit, selon les conditions de température et de pression, à la très grande variété de structures cristallines lors de la glaciation. Dans les conditions de pression atmosphérique à la surface de la terre, la structure hexagonale découverte par Tammann en 1900 est celle qui prévaut. Des hexagones formés par 6 molécules se forment, et ils s'assemblent l'un contre l'autre par décalage permettant aux pôles positifs d'être positionnés en vis-à-vis de pôles négatifs. La distance entre ces pôles qui s'attirent est strictement limitée par le bouclier que forme le nuage électronique de l'atome d'oxygène, ce qui définit strictement la densité de l'ensemble.

Et cette densité est inférieure à celle de l'eau liquide dont les molécules forment des assemblages plus compacts : en effet l'oxygène d'une molécule s'associe par liaison hydrogène aux deux hydrogènes d'une autre molécule, cependant que ses deux hydrogènes s'associent à l'oxygène d'une troisième molécule et ainsi de suite.

On a donc, à partir de $3,94^{\circ}$, simultanément, une diminution de l'agitation moléculaire et un assemblage hexagonal qui, dans son équilibre électrostatique, augmente le volume spécifique.

La thermodynamique de ces deux phénomènes conjugués est une perte d'énergie d'agitation limitée par la structuration hexagonale. Des hexagones se forment progressivement, mais à 0° , l'agitation thermique se stabilise et l'échange liquide-glace se fait par la chaleur spécifique de fusion.

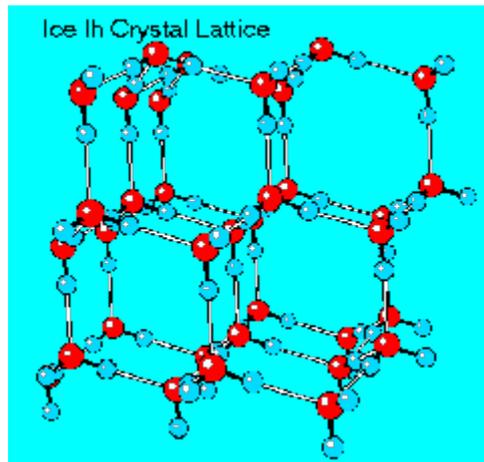


Figure 3: Structure hexagonale de la glace (glace Ih)

Il peut évidemment paraître paradoxal qu'un refroidissement (perte d'énergie cinétique) se traduise par un gonflement dont on connaît bien la puissance. Mais que l'on pense, symétriquement, à la puissance de rétractation d'une barre de fer lorsqu'on la refroidit. En effet, dans ce cas, le travail que fournit la barre de fer pour déplacer ses ancrages utilise une partie de l'énergie cinétique de ses molécules, le reste étant absorbé par son environnement froid.

Il faut toujours appliquer le principe de conservation de l'énergie.

Le caractère bipolaire d'eau en fait un corps aux propriétés très originales qui ont longtemps été un mystère. Au fil des dernières décennies, tous les mystères de l'eau ont été élucidés. Il en va de même de beaucoup d'autres propriétés et processus jugés mystérieux.

(Pour plus de détails, voir Prozan* , CNRS.)

2 - les rouleaux de Bénard.

Cet exemple concerne une émergence de régularités remarquables sous l'effet de contraintes environnementales. Le phénomène des rouleaux de Bénard*, découvert et décrit par Bénard vers 1900, concerne l'apparition, dans certaines conditions, de rouleaux de convection au sein d'un fluide soumis à des écarts de température.

Je choisis cet exemple physique parce qu'il a été complètement modélisé, mais qu'il est encore l'objet de présentations peu claires concernant précisément les « actions » de l'environnement, que l'on assimile abusivement à des actions du tout sur les parties.

Je signale en particulier un texte paru dans *Interface Focus*, revue de la Royal Society, sur le thème de la « causalité descendante » (Top Down Causation). Le physicien anglais R. Bishop* y développe un argument qui s'oppose à la vision réductionniste, en invoquant le caractère non linéaire de ces phénomènes. De plus, comme dans la plupart des textes présentés par cette revue sur le thème de la « causalité descendante », une confusion apparaît entre les contraintes (le plus souvent passives) de l'environnement du « système », et le système, en tant que transmetteur de ces contraintes.

Pour ne prendre qu'un exemple qui pourra introduire aux rouleaux de Bénard, lorsqu'un fluide s'écoule dans une tuyère, la réaction qu'exerce la tuyère sur les molécules du fluide est évidemment transmise de proche en proche à l'ensemble des molécules du fluide.

Le résultat de ces interactions, est décrit par la mécanique des fluides (théorèmes de Navier-Stokes et de Karman-Nikuradze). Que gagne-t-on à invoquer l'action de la tuyère sur le flux, ayant pour conséquence l'action du flux sur chacune de ses molécules ? Qu'est-ce que « le flux » ? Quelle est la nature de ce « tout », qui régit chacune de ses parties ? Nous ne sommes pas bien inspirés en allant dans cette voie.

L'expérience des rouleaux de Bénard-Rayleigh consiste à établir un gradient de température entre deux plaques horizontales (en verre pour suivre le phénomène), plaques assez proches pour qu'un liquide visqueux (une huile translucide) y soit stable du fait des forces de Van der Waals. Lorsqu'on chauffe la plaque inférieure, le liquide reçoit et transmet la chaleur fournie jusqu'à la plaque supérieure qui la dissipe dans l'atmosphère.

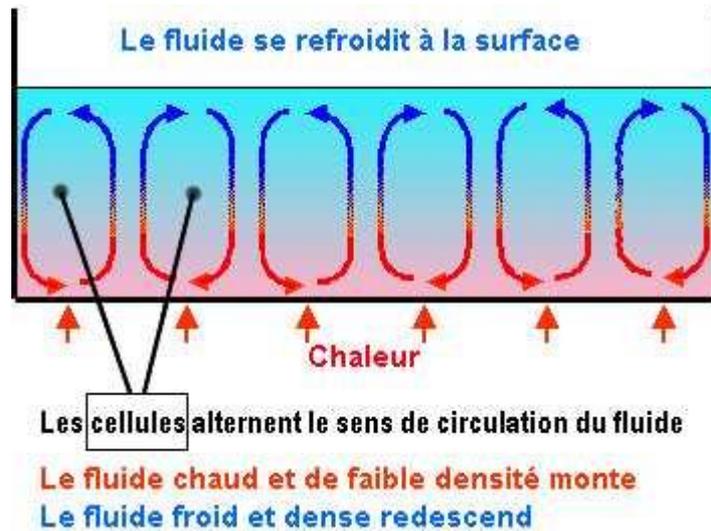


Fig 4 Schéma de formation des rouleaux de Bénard. Luna04 at French Wikipedia [GFDL]

Suivant le gradient de température, la distance entre plaques et la viscosité du liquide, on voit le liquide animé de mouvements très divers : repos apparent avec conduction de la chaleur, mouvements laminaires plus ou moins ordonnés, mouvements chaotiques, et, dans certaines conditions assez précises, formation de rouleaux parallèles tangents aux deux plaques, et tournant successivement en sens contraires.

Il s'agit d'un phénomène de type tourbillonnaire, que Prigogine* a désigné sous le nom de structures dissipatives, et qui, en théorie, est décrit macroscopiquement par les théorèmes de Navier-Stokes et de Karman-Nikuradze. Le point de départ de ces phénomènes est très dépendant des conditions initiales. Leur stabilisation correspond à une optimisation de la dissipation d'énergie.

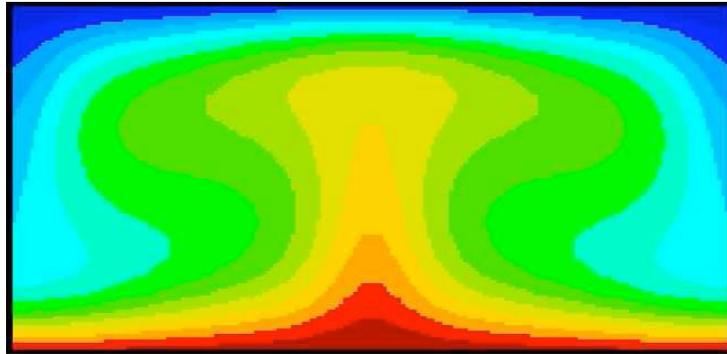
La formation de ces rouleaux est caractéristique de systèmes où les contraintes environnementales créent des situations alternativement chaotiques et régulières. (bifurcation).

En un point de la plaque inférieure chauffée, le liquide s'échauffe, sa densité diminue, et la poussée d'Archimède provoque une colonne ascensionnelle. qui va buter sur la plaque supérieure et s'y refroidir. L'huile refroidie va redescendre plus loin en formant des colonnes descendantes, (forme d'écoulement des anciennes lessiveuses) et le flux descendant entraîne par viscosité des molécules plus éloignées qui vont à leur tour repartir plus loin dans un mouvement ascendant qui créera un nouveau cycle rotatif.

Le phénomène de départ est dépendant de conditions initiales qu'on ne pourrait tenter de gérer qu'en produisant un réchauffement ponctuel favorisant le premier mouvement ascensionnel.

Ainsi, par entraînements successifs, des rouleaux se forment, puis se déforment et se stabilisent sous la contrainte des bords de l'objet expérimental. Le phénomène global

apparaît donc comme la résultante des interactions moléculaires (la viscosité) et des contraintes physiques (mécaniques et thermodynamiques).



*Figure 5: Visualisation numérique de rouleaux de convection. Champ de température.
La figure montre deux rouleaux ; les gradients de température vont du rouge (chaud) au bleu sombre (froid).*

Ce phénomène a été modélisé, de manière limitée, par Boussinesq* en 1920, puis, plus largement par Edward Lorenz* en 1962.

Boussinesq* a établi les équations qui définissent la transition de la conduction à la convection, en linéarisant les formules au voisinage du point critique. Ce dernier est repéré par un nombre sans dimension, dit « nombre de Rayleigh », qui se définit comme le produit du nombre de Grashof, reliant la force d'Archimède à la viscosité du fluide, et du nombre de Prandtl qui relie la viscosité cinématique) et la diffusivité thermique

En 1962 et 1963, Edward Lorenz*, un météorologiste américain, a constaté que les rouleaux de Bénard pouvaient être une bonne approche des courants de convection océaniques et atmosphériques, et il a construit un modèle beaucoup plus efficace en discrétisant les équations, ce qui facilitait largement le traitement.

Cette approche a conduit à des développements mathématiques permettant des améliorations intéressantes dans la précision des calculs (équations différentielles).

Ces modèles sont des modèles macroscopiques.

En effet, le phénomène qui entraîne chaque molécule dans le mouvement d'ensemble ne peut être décrit que dans un modèle statistique. Mais il nous est beaucoup plus facile de représenter le phénomène global dans des équations déterministes, et c'est la raison pour laquelle les recherches sur les morphogenèses, visent à modéliser le phénomène global.. Les lois qui ont décrit les phénomènes de la thermodynamique classique sont la base sur laquelle nous fondons la pertinence des modèles; de même, les lois d'évolution dynamique, en thermodynamique hors d'équilibre nous suffisent pour valider nos

modélisations. Les rouleaux de Bénard sont un cas typique, dans le domaine de la physique non linéaire, d'une morphogenèse, et ils correspondent au modèle le plus général de morphogenèse, c'est-à-dire de génération de formes sous contraintes. Les contraintes sont passives, mais l'action par laquelle le milieu en développement se déploie est infléchi pour l'obliger à prendre des orientations, des symétries, des formes, des structures. Holland* a présenté ce schéma général dans son concept de CGP (« Constraint Generative Procedure », Processus de génération sous contrainte).

Je souhaite revenir au texte de Bishop* évoqué plus haut, car il est caractéristique d'une vision qui, pour s'opposer au physicalisme, introduit des notions que l'on ne peut pas modéliser, et qui conduisent à invoquer la non linéarité pour cacher l'incapacité à expliciter les phénomènes dans une représentation intelligible (pour les cerveaux humains).

Dans un système soumis à des contraintes passives, l'effet de ces contraintes peut conduire à des comportements « globaux ». Mais il n'y a pas de modèle permettant de déduire du comportement global le comportement de chaque élément de ce « tout ».

On a donc des modèles macroscopiques qui peuvent prendre en compte les contraintes du système (fluide dans le cas de Bénard), et une théorie (physique statistique) qui fait le lien entre le microscopique et le macroscopique.

Mais que signifie l'affirmation selon laquelle le « rouleau de Bénard » impose leurs trajectoires aux molécules qui en font partie ? Quelle est la nature de cette « personnalisation du rouleau » ?

Cette dispute entre réductionnistes et leurs opposants se fonde sur la prétention, souvent implicite, que les lois de la physique sont les lois physiques de la nature.

Si nous quittons cette visée ontologique, nous sommes dans une représentation pragmatique des phénomènes naturels. Au plan macroscopique, nous cherchons à représenter par des formules le plus simples possible, (le plus souvent linéaires), les phénomènes physiques, en choisissant des variables et des paramètres qui permettent cette représentation.

Au plan microscopique, nous sommes réduits à des représentations statistiques, et tout le travail de la physique statistique a consisté à faire, avec succès, le lien entre ces deux modes de représentation.

Les rouleaux de Bénard révèlent une stabilisation dynamique, ordonnée, des phénomènes de transmission de chaleur. Cet ordre ne peut apparaître que pour des valeurs relatives des caractéristiques physique (viscosité, température) et géométriques (formes et dimensions) situées dans une plage hors de laquelle des mouvements chaotiques s'installent. Lorsque la stabilisation dynamique s'établit, elle assure la transmission la plus rapide de l'énergie calorifique, ce qui entraîne sa stabilisation.

Ces régularités sont le résultat, bien représenté par le modèle de Lorenz, de la résultante des forces qui agissent sur les molécules liquides et de l'interaction des molécules entre elles et avec leur environnement, source principale des contraintes qui produisent, dans une certaine plage de conditions, les rouleaux de convection.

3-4-5 Trois exemples de développements évolutifs, c'est à dire adaptatifs, ou darwiniens

Dans les morphogenèses, le principe moteur est la capacité de développement.

Cette capacité a un prix énergétique. Il faut que l'environnement fournisse cette énergie, moyennant quoi toute création d'ordre correspond à une diminution d'entropie aux frais de l'environnement.

Chez les êtres vivants, en même temps qu'ils se développent, des fonctions se mettent en œuvre, et ces fonctions sont toujours des échanges énergétiques, donc des phénomènes thermodynamiques.

L'être vivant est, d'abord, un système qui échange de l'énergie avec son environnement. Cet échange prend toutes sortes de formes : absorption directe d'énergie (lumière solaire) absorption de matériaux (alimentation), émission d'énergie par les mouvements et déplacements, etc...

Dans cette troisième partie, qui se rapporte à l'évolution des lignées d'êtres vivants, je souhaite montrer sur des exemples – toujours très simple – que l'évolution, elle aussi, a un coût énergétique qui relève d'une interprétation thermodynamique..

J'observerai d'abord qu'une espèce en croissance ou stabilisée consomme, pour sa survie, une quantité d'énergie que son environnement doit lui apporter.

-qu'une espèce soumise à des prédateurs doit s'en défendre, et ceci a un double prix énergétique : la défense contre les prédateurs d'une part, la reconstitution de l'effectif érodé par les prédateurs d'autre part.

La lutte contre les prédateurs, ou contre les modifications des conditions naturelles défavorables a pour prix la sélection évolutive.

Ce prix peut être très élevé, car une proportion importante des individus de l'espèce peut disparaître pendant qu'une partie, bénéficiant de conditions adaptatives efficaces, survivra et devra procréer pour rétablir un équilibre du milieu écologique favorable à l'espèce. (Ou bien, l'espèce peut disparaître).

je donne ci-après un exemple très simple de sélection adaptative, puis deux exemples de formation progressive d'organes et d'aboutissement à des mécanismes physiologiques.

J'évoquerai le long processus adaptatif qui a conduit à la formation progressive de l'œil, puis, je présenterai le mécanisme de thermorégulation des animaux à sang chaud.

Le premier exemple n'a pas l'ambition de décrire un processus qui passerait par une modification (aléatoire) du génome : une telle modification ne peut intervenir que sur des périodes « géologiques ». En revanche la sélection d'une variété génétique dans une espèce peut être très rapide comme le montre l'exemple que j'ai choisi.

Les mécanismes physiologiques ont été également sélectionnés par « essais et erreurs (souvent fatales sans doute). Ce sont souvent des mécanismes très directs, qui nous semblent avoir été mis en place « dans le but » de remplir une fonction. L'idée de l'évolution nous interdit d'introduire la notion de finalité, puisqu'elle pose le principe de l'adaptation sélective. Le schéma déterministe (détection de température, puis commande de réaction adaptée), dans l'exemple de la thermorégulation, fait évidemment penser au système de régulation de chauffage installé par un ingénieur. Mais la nature a mis des millions d'années pour voir apparaître la thermorégulation animale. On peut faire un parallèle encore plus saisissant à propos des oiseaux. A la longue incubation naturelle qui a abouti à leur apparition, on opposera l'évidence ci-après : arrivé à un niveau convenable de développement technique, l'homme, en quelques instants, a fabriqué des avions et en sillonne le ciel

. La morphogenèse de l'œil paraissait tellement complexe que Darwin la considérait comme un obstacle au plein développement de sa théorie de l'évolution. Les découvertes des paléontologues et l'analyse de l'embryogenèse de l'œil ont mis en évidence le processus évolutif qui, en 100 millions d'années à la fin du précambrien (-600 Ma) a conduit à la formation de l'œil, et a montré qu'en l'occurrence « l'embryogenèse récapitule la phylogenèse ».

3 - Les papillons des crassiers

Un exemple très récent et singulièrement rapide a été constaté il y a un siècle environ : des papillons vivants dans le nord de la France dans un équilibre écologique établi de longue date ont vu leur espèce mise en péril par l'exploitation du charbon. Les crassiers se sont

largement développés, et ces papillons aux ailes blanches, sur le fond noir des crassiers, devenaient beaucoup plus visibles pour leurs prédateurs. La race aurait été mise en péril mortel si certains des individus n'étaient apparus porteurs d'ailes noires. En fait, il y avait toujours eu quelques originaux dotés d'ailes noires, mais soudain, ils devenaient moins vulnérables et ils ne tardèrent pas à fonder une population de papillons noirs.

Un nouvel équilibre écologique s'établit.

Mais, quelques décennies plus tard, ce fut la fin de l'exploitation et les crassiers devinrent, assez rapidement, des collines arborées et fleuries. Renversement tragique de la situation pour les papillons noirs... Les quelques congénères à ailes blanches reprirent le dessus, et, désormais, la grande majorité des papillons sont blancs.

4 - La régulation thermique des animaux à sang chaud

La régulation animale de température est assurée essentiellement par l'hypothalamus qui réagit, d'une part, à la température du sang pour assurer l'essentiel, c'est-à-dire la température uniforme et constante des viscères et, d'autre part, avec moins de rigueur, aux informations apportées par les nerfs périphériques qui transmettent la sensibilité de la peau aux variations externes de température. Il s'agit là d'une action directe et contrôlée du système nerveux.

Le sang qui irrigue le système nerveux arrive au contact des neurones de l'hypothalamus.

La membrane de ces neurones comporte des canaux ioniques. Il s'agit de molécules tubulaires dont l'intérieur du cylindre comporte des filaments pouvant se contracter pour bloquer tout passage d'ions, ou au contraire s'amollir pour ouvrir le passage.

Les canaux ioniques présentent une grande variété avec des spécificités très précises. Ainsi, dans l'hypothalamus, il y a deux groupes de neurones spécifiquement capables de détecter, par leurs canaux ioniques, la température du sang. Le premier groupe réagit à une température supérieure à la normale, le second à une température inférieure. Le mécanisme de cet apprentissage n'est pas élucidé. Est-il d'ordre génétique, s'agit-il d'un « apprentissage » de l'embryon induit par la mère ?

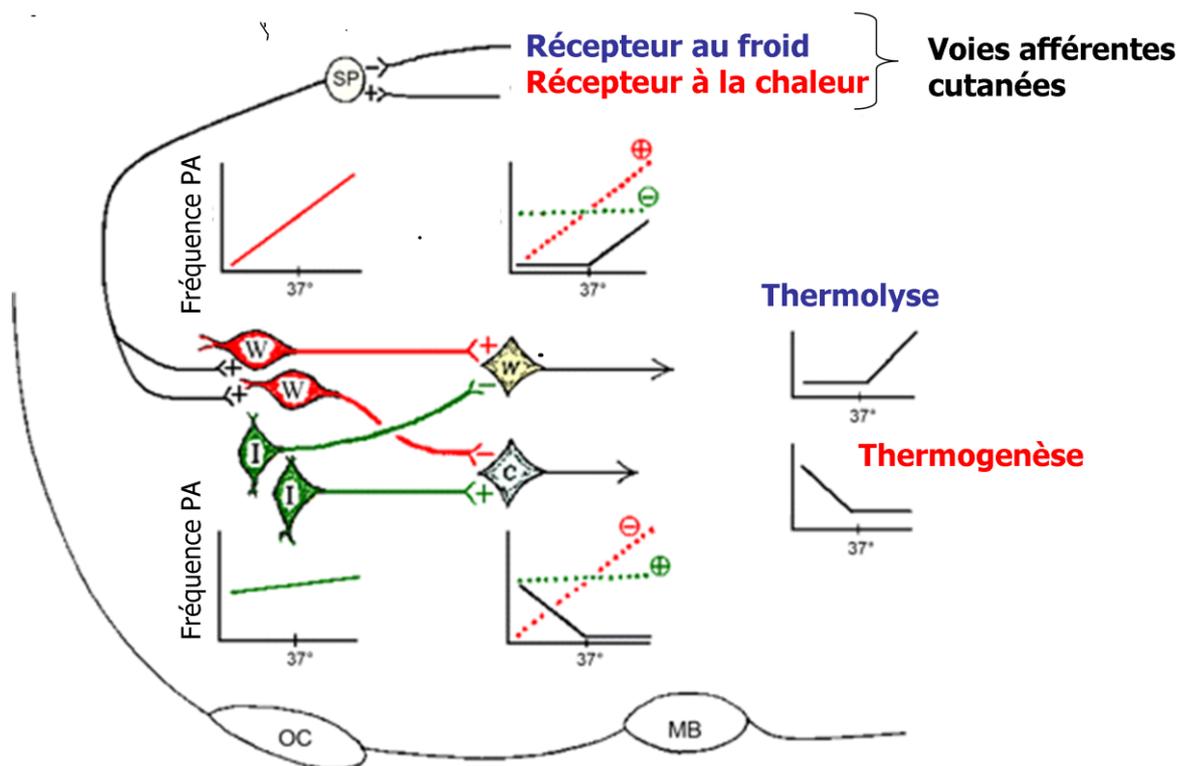


Figure 7 Adaptation du modèle de Hammel HT (1965) pour expliquer la régulation de la température autour d'une valeur de consigne par un réseau synaptique et neurones hypothalamiques. SP: neurone de la corne dorsale de la moelle épinière. OC: chiasma optique. MB: corps mamillaires. Cours de physiologie, V. Gayraud*, envt 2013).

Dans les deux cas d'écart de température par rapport à la norme de l'espèce, l'ouverture des canaux ioniques provoque un passage d'ions qui a pour conséquence un chaîne de processus conduisant à une action en contraction des muscles lisses de réseau sanguin, (vasoconstriction), en cas de température excessive, tandis que le second groupe de neurones agit en sens inverse. Ainsi se trouve réalisée la régulation thermique des viscères avec une grande efficacité. Lorsque la température interne ne dépasse pas des seuils très proches de la normale (de l'ordre de 1° C), les deux réseaux de neurones thermoactifs sont au repo

Pour le contrôle de la température de l'enveloppe corporelle (muscles, squelette et peau, ce sont les réseaux de neurones affleurant au derme qui détectent la température de la peau avec une plage de tolérance plus large autour de 20° C.

Ce sont, ici aussi, les canaux ioniques, (mais ceux des nerfs affleurant à la peau), qui sont réglés pour ce contrôle. Deux sortes de canaux réagissent soit à un excès, soit à une baisse

de température dans l'environnement. Les impulsions électriques qu'ils envoient à l'hypothalamus provoquent, selon le cas, une chaîne de processus conduisant à une activation musculaire, à des frissons, et autres réactions exothermiques, tandis que, dans le cas d'une élévation contrôlée de la température, la chaîne de processus conduit à la sudation, et à l'évaporation rafraîchissante dans le cas d'une température excessive.

Ci-après, schémas du fonctionnement des glandes sudoripares.

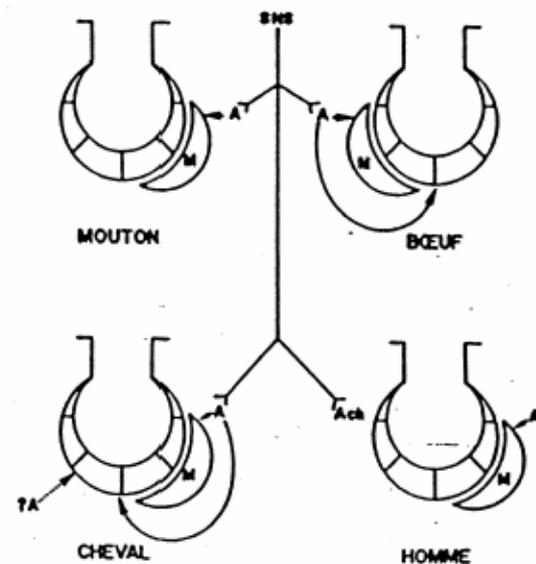
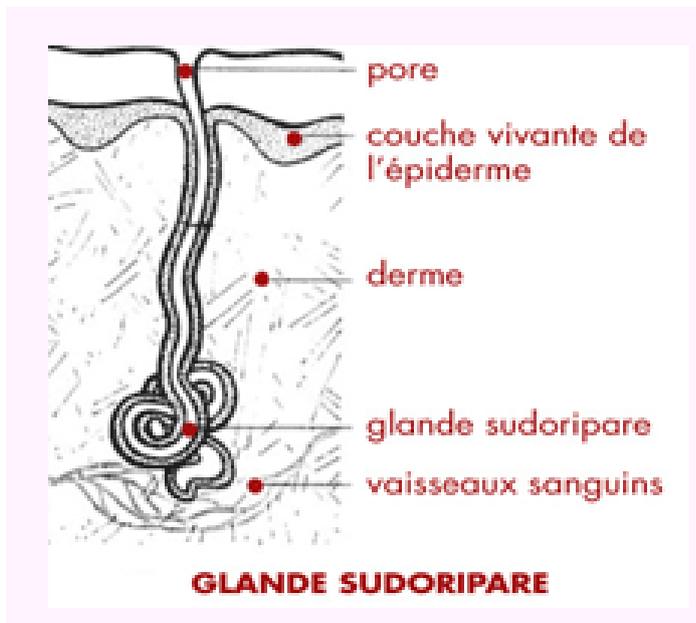


Figure 8 : Glandes sudoripares chez différentes espèces de mammifères. SNS : système nerveux sympathique, A : adrénaline, acétylcholine, M : cellules myoépithéliales, adapté d'après Whittow (1973). (Gayrard* op. cit.)

Longtemps, ces phénomènes ont été analysés en termes de processus très complexes et mystérieux. On parle de boucles de rétroaction, de causalité descendante et autres phénomènes qui n'autorisent pas de description et d'explication. Je note que, dans la revue « Interface Focus, Top Down Causation citée plus haut (Article de Bishop*), le mathématicien G. Elli*s évoque la question de la régulation thermique comme un exemple de causalité descendante. Il fait l'amalgame entre la régulation industrielle d'une chaudière et la thermorégulation animale.

Or, les deux processus sont très différents.

L'ingénieur définit le but à atteindre, et en déduit la procédure permettant d'y arriver, puis, il imagine le dispositif ad hoc, et finalement, il construit le thermostat. Cette méthode, analysée selon les causalités aristotéliennes, part des causes finales pour remonter aux causes matérielles.

L'évolution, dans son schéma adaptatif, a fait le chemin inverse sans se préoccuper des causes finales, et en atteignant, avec le succès nécessaire à leur durabilité, les causes efficaces, c'est à dire les conditions de fonctionnement physiologiques assurant l'adaptation de l'être vivant à son milieu naturel.

Le milieu naturel agit donc comme une contrainte environnementale, et c'est l'organisme qui accède ou n'accède pas à la capacité adaptative. On ne peut pas parler du milieu en tant que « cause » de la régulation, alors qu'il est licite de parler du « projet » de l'ingénieur en tant que déterminant les processus successifs conduisant à la construction du thermostat.

L'analyse de la thermorégulation, que l'on trouve dans tous les bons manuels de physiologie, décrit avec précision le fonctionnement animal du contrôle de température. On peut en trouver une présentation très claire dans le chapitre correspondant du cours de physiologie de V. Gayrard*, de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse. auquel j'ai emprunté les trois schémas donnés ci-dessus.

Certes, la précision avec laquelle des molécules (les canaux ioniques) sont capables de détecter des températures, des taux de concentrations d'ions, des potentiels électriques, la manière dont le cours de l'évolution les a produites, fixées de manière spécifique, reste encore à élucider, mais le principe même de cette élucidation est désormais au programme des scientifiques. Il est indubitable que les canaux ioniques, qui sont des molécules complexes, sont modifiées dans leur géométrie par l'effet de leur environnement électronique, voire seulement par des pressions électrostatiques. On peut donc conjecturer que, comme pour le repliement des protéines, des forces de Van der Waals sont à l'œuvre pour orienter des filaments dans la géométrie des canaux ioniques.

La détection d'une température peut s'exercer par l'effet, sur le nuage électronique du canal ionique, du rayonnement infrarouge émis par son environnement.

Cette détection peut être très précise si elle est réglée sur une fréquence du rayonnement détecté. Dans cette hypothèse, le quantum énergétique du rayonnement est à l'origine de la variation géométrique (ou électrostatique) de la molécule.

5 - Comment l'œil est-il apparu ?

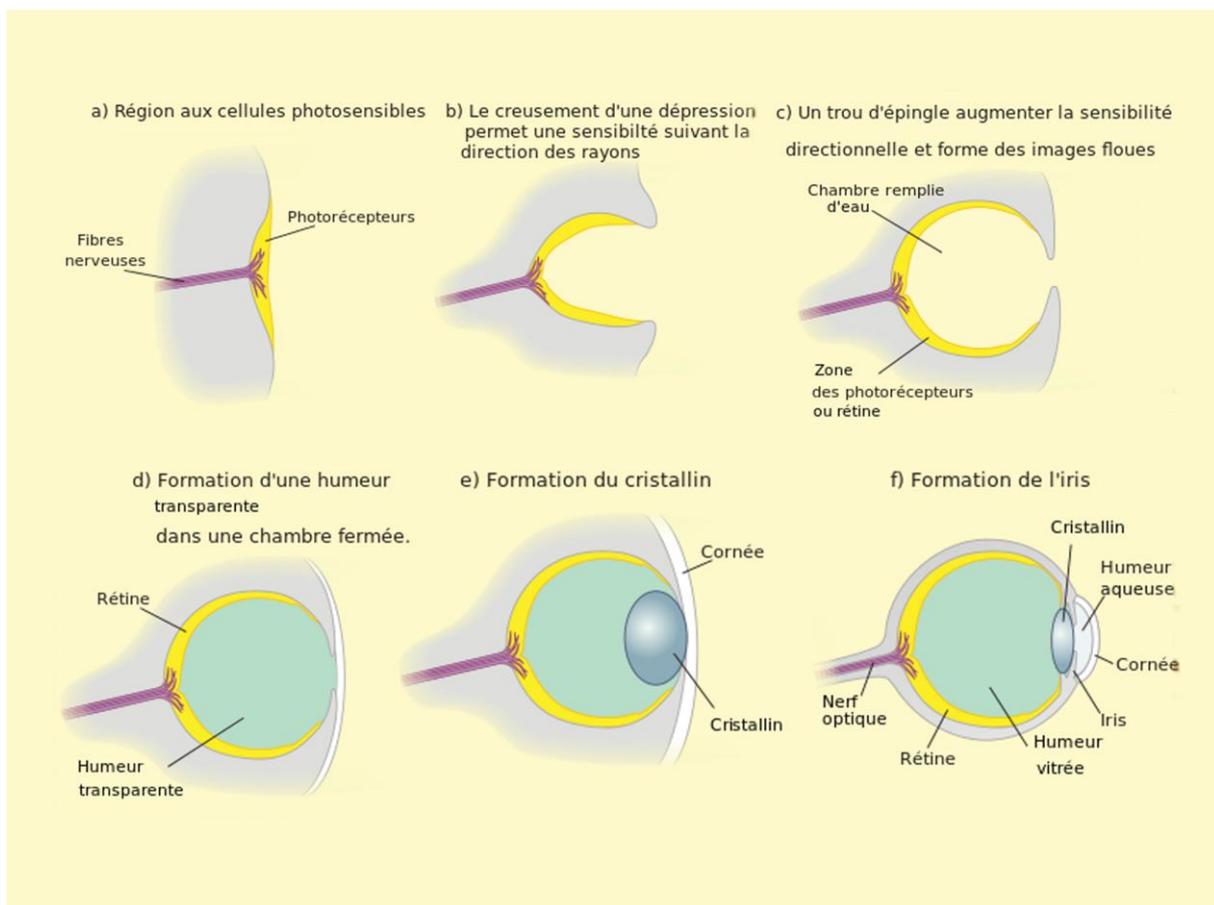


FIG.8 La figure 9 présente les différents stades de l'embryogenèse de l'œil des vertébrés supérieurs, qui correspondent au développement darwinien de la vision, tel que les recherches paléontologiques L'ont révélé (CNRS)

Les premières perceptions de lumière par des cellules photosensibles ont été suivies par la formation de « puits » de captation de lumière. Ensuite, des amas transparents ont formé des loupes, et, dès lors, le développement d'un organe spécifique de vision a été enclenché. On peut trouver une présentation de ces recherches chez M. F. Land & D.E. Nilsson, *Animal Eyes*, Oxford University Press, 2002

Darwin a dû défendre âprement sa thèse de l'évolution. Mais il est resté jusqu'à la fin de sa vie dans la plus grande perplexité au sujet de l'apparition de l'œil dans un processus évolutif.

Les travaux et les découvertes des paléontologues ont largement contribué à éclairer ce processus. Une évaluation, par excès, a été faite, sur des bases évolutionnaires, du nombre de générations nécessaires pour obtenir un cristallin : le résultat annonce un maximum de 400.000, générations.

Si on évalue une durée sur la base très haute de 25 ans pour une génération, on évalue à 10 Ma la période nécessaire à la formation de l'oeil, ce qui est peu en regard des 670 Ma de la vie multicellulaire.

Il est probable que les paléontologues nous apporteront des précisions sur cette question.

Pendant tout le 20^{ème} siècle, de nombreuses voix, à commencer par celles de H. Bergson et de A. Koestler, se sont opposées à la vision darwinienne.

Après les travaux innombrables qui ont amené une foison d'information sur les processus évolutionnaires, ces oppositions sont définitivement balayées. Les opposants de Darwin sont désormais les adeptes de « 'l'intelligent design », qui campent sur une croyance.

Conclusions

1 - Ma première conclusion concerne les phénomènes émergents. Désormais, les processus complexes peuvent et doivent être étudiés à partir des propriétés de leurs éléments, des interactions de ces derniers, et de leurs interactions avec leur environnement. Si ces processus conduisent, c'est un cas très fréquent, à l'apparition de structures dotées de propriétés originales, il sera peut-être possible de prévoir l'avènement de ces propriétés à partir des données concernant les éléments et leurs interactions : c'est ce que l'on sait prévoir aujourd'hui des propriétés d'une molécule (en pharmacologie notamment) à partir des propriétés de ses éléments constitutifs et de leur mode d'assemblage.

Je propose donc de réserver le terme d'émergence aux processus de transition entre niveaux d'intégration. In outre, j'adopte le terme deCGP (Constraint Generative Procedure - Processus de développement sous contrainte) proposé par J. Holland* pour désigner les morphogénèses.

2 - La deuxième conclusion est d'ordre méthodologique et elle rencontre souvent de fortes opportunités dans l'étude des milieux complexes : l'étude des systèmes complexes révèle le

plus souvent des niveaux successifs d'intégration. Il est alors intéressant de passer d'un niveau au niveau supérieur en considérant les résultats d'une première intégration comme éléments dans une intégration de niveau supérieur. Et ainsi de suite.

Cette méthodologie par niveaux est largement applicable en biologie et dans les sciences sociales.

3 - Enfin, en revenant sur le principe d'explication thermodynamique de tous les phénomènes dynamiques et en particulier de ceux de la biologie, il est essentiel de constater que la thermodynamique a été fondée au niveau de notre interprétation macroscopique, que le lien a été fait ensuite entre les niveaux macroscopiques et microscopiques, que le principe de l'interprétation quantique de tous les phénomènes élémentaires a été instaurée. Cette vision globale est tout à fait théorique. Mais l'étude des phénomènes naturels doit être abordée au niveau qui nous paraît le plus adéquat. Cette règle pragmatique permet l'avancement de la science, pas à pas, par approximationq successives. .

Références

Balian (Roger Balian) Du microscopique au macroscopique, Ellipses, 1990.0à
Bennett (Charles H. Bennett) Logical Depth and Physical Complexity, in "The
Universal Turing Machine", Oxford University Press, 1988.

Bishop : Robert C. Bishop. Fluid convection, constraint and causation. Interface
Focus
2012.

De Duve . Christian de Duve Singularités; jalons sur les chemins de la vie. Odile
Jacob 2002.

Ellis : George F. R. Ellis Top-down causation and emergence: some comments on*
mechanisms. Interface Focus, 2012.

Gayrard : Véronique Gayrard, Département Physiologie. Cours de Physiologie.

ENVT « Thermorégulation ». 2012.

Gell Mann : Murray Gell Mann Le quark et le Jaguar, Albin Michel Sciences
1996

Holland : John XXXHolland. . Emergence. From chaos to order. New York, Basic
books. 1998.

- *Kolmogorov 1991–93. Selected works of A.N. Kolmogorov, 3 vols. Tikhomirov, V. M., ed., Volosov, V. M., trans. [Dordrecht!Kluwer Academic Publishers](#) ISBN 90-277-27961*

ILand et Nilsson : M. F. Land & D.E. Nilsson, Animal Eyes, Oxford University Press, 2002

Lorenz : Edward ELorenz : Deterministic nonperiodic flow, Journal of the Atmospheric Science, 20, 130-141, 1963.

Mandelbrot Benoît Mandelbrot Les Objets fractals : forme, hasard, et dimension, trad., Flammarion, 1973.

Noble : Denis Noble “La musique de la vie”, Le Seuil, Science ouverte, 2007.

Prigogine : . Ilya Prigogine, Thermodynamique, des moteurs thermiques aux structures dissipatives - avec Dilip Kondepudi, Odile Jacob, 1996

Pruzan : Philippe Pruzan Laboratoire de physique des milieux condensés, Université Paris VI L'eau. Editions CNRS 2012.

Schrödinger Erwin Schrödinger, “Qu'est-ce que la vie” (orig. « What is Life ?», 1944), Christian Bourgois, 1986.

ANNEXE

Interactions électroniques

Les interactions électroniques sont à l'origine de tous les événements de la nature, à l'exception des interactions nucléaires et des chocs énergétiques (photons, neutrons, noyaux d'hélium...).

La grande variété de ces interactions tient au fait que les électrons peuvent être plus ou moins liés à des noyaux atomiques et que leurs effets peuvent provenir de la nature et de l'extension du nuage électronique qu'ils constituent, ou seulement des forces électrostatiques que ces nuages exercent.

Les électrons peuvent en outre être plus ou moins fortement liés aux noyaux atomiques, et, dans certains cas, les nuages atomiques forment un ensemble qui englobe l'ensemble des noyaux (liaison métallique).

On classe en général ces interactions en quatre groupes : chimiques, ioniques, métalliques et forces de Van der Waals.

En fait, il s'agit d'un ensemble d'interactions de niveaux énergétiques différents.

- 1 - liaisons covalentes : il s'agit de liaisons très fortes faisant intervenir deux électrons qui forment une espèce de nasse enserrant deux noyaux atomiques. On les rencontre surtout en chimie, mais aussi dans la physique du solide et en cristallographie. Deux exemples . Le diamant tient son extrême résistivité des liaisons doubles qui unissent les atomes de carbone ; une molécule de CO_2 est extrêmement stable grâce à ses deux liaisons covalentes.
- 2 – électrovalence : on appelle ainsi (par la tradition du langage des chimistes), une liaison du même ordre liant deux noyaux atomiques par un seul électron.. La plupart des sels ionisables correspondent à cette liaison. Ex. Na-Cl, qui est, pour les raisons évoquées dans l'article, dissocie aisément, ce qui rend l'eau conductrice d'électricité et favorise l'électrolyse. On appelle aussi, pour cette raison, « liaison ionique cette interaction.

A noter que dans certaines structures cristallines, les liaisons complexes peuvent être intermédiaires, du fait des liaisons électroniques complexes. On parle de « liaison ion-covalente ». Ex : cas de la blende.

- 3 - Liaison hydrogène :Les liaisons hydrogène sont des liaisons spécifiques d'un atome d'hydrogène (appartenant à une molécule) et d'un atome portant un doublet électronique sur une autre molécule . Cette liaison permet des associations de molécules, souvent à grande portée. Selon la taille des molécules, leur forme et la nature des noyaux atomiques en liaison, les distances entre ces noyaux et la puissance de la liaison couvrent une gamme de valeurs étendue, allant du niveau de la covalence à celles des forces de Van der Waals, que je présenterai en dernier lieu.

La liaison hydrogène permet aux molécules de l'eau liquide et de l'ammoniac liquide de s'assembler de manière assez forte pour résister à des élévations de température, ce qui explique la température d'ébullition anormalement élevée de ces liquides. Lorsque ces liaisons sont assez fortes, elles s'apparentent aux liaisons chimiques, avec des distances entre atomes de l'ordre de 2 Angstroms. Alors, les molécules adoptent des positionnements assez précis et stables. C'est ce qui se passe avec les enchaînements linéaires de l'eau liquide (densité assez forte), et la structure hexagonale-tétraédrique de la glace (densité plus faible).

La liaison hydrogène est largement responsable de la cohésion et de la résistance mécanique des polymères.

Les liaisons hydrogène des molécules biologiques sont plus faibles (la distance entre atomes est de l'ordre de 3 ou 4 Angströms). Cette souplesse favorise l'évolution des structures biologiques, ce qui explique son omniprésence dans ce domaine. Pour ne citer

que deux exemples, ce sont des liaisons hydrogène qui unissent les doublets des chaînes ARN et ADN, elles aussi qui sont responsables du repliement des protéines.

4 - Cristaux

Les liaisons électroniques qui assurent la cohésion des cristaux sont du type des liaisons chimiques, en ce sens que les molécules s'articulent les unes aux autres par des liaisons ioniques, mais que lorsque l'arrangement est réalisé, les électrons établissent des liaisons d'atome à atome qui associent ainsi les atomes dans un réseau qui dépasse la structure moléculaire d'origine.*

Mais l'intensité de liaison propre à la molécule est une donnée qui persiste et donne aux structures cristallines résultantes leur résistivité. C'est parce que les électrons restent attachés à leurs atomes que les plans d'arrangements du cristal (macroscopique) sont des plans de clivage.

5- Liaison métallique.

Les métaux ne s'arrangent pas dans des structures cristallines parce qu'ils sont tous dotés d'une dernière couche électronique très incomplète, ce qui donne à leurs électrons une certaine labilité.

Il s'ensuit un phénomène spécifique : les électrons de cette couche forment un nuage qui se comporte indépendamment de son substrat atomique et qui constitue, en même temps un réseau assurant la résistivité de l'ensemble. Parallèlement, ce nuage est un réseau électronique qui donne au métal sa conductivité électrique. Dans une différence de potentiel entre deux points du métal, les électrons se comportent comme un fluide.

6- Forces de Van der Waals.

Les forces de Van der Waals sont de nature essentiellement électrostatiques qui unissent des dipôles deux à deux. Leur nature n'est pas différente de celle de la liaison hydrogène, mais elles se manifestent avec une grande variété de molécules qui peuvent être dipolaires, auquel cas les assemblages se font de pôle positif à pôle négatif, comme dans le cas de l'eau, mais aussi ces forces peuvent se manifester entre un dipôle et une molécule non polarisée, auquel cas le dipôle peut induire une polarisation de la molécule non polarisée, et même on voit des molécules non dipolaires se polariser du fait des interactions entre nuages électroniques.. Dans l'ordre ci-dessus, ces phénomènes ont reçu le nom des physiciens qui les ont découverts et théorisés : Keesom, Debye, et London.

Les forces de Van der Waals sont donc des forces attractives qui s'exercent au-delà de la distance où les nuages électroniques se repousseraient.

Elles conduisent aux effets suivants :

1 à l'interface d'un liquide et d'un gaz ou un liquide (non miscible au premier), les molécules qui sont en surface sont attirées vers l'intérieur, ce qui stabilise la surface et lui donne une résistance à la déformation. On appelle cette force tension superficielle. C'est cette force qui assure la cohésion d'une goutte d'eau dans l'air.

A noter que, à la surface d'un liquide et d'un gaz, des molécules passent en permanence d'une phase à l'autre, ce qui conduit à un équilibre liquide-gaz. Dans le cas de l'eau et de l'air, c'est la pression de vapeur saturante qui définit cet équilibre.

Au contact avec un solide, les molécules de surface peuvent être soit attirées, soit repoussées, selon la nature (chimique) des molécules en contact. Dans le premier cas, la surface de contact tend à s'étendre (mouillage), dans le second cas, il y a restriction au contact : phénomènes de ménisques, gouttes de mercure, etc..... Le nom de capillarité est donné aux phénomènes de mouillage.

Pour conclure, les interactions électroniques, qui impliquent toujours le changement d'état quantique d'un électron, sont la condition de tout phénomène de la physique macroscopique et de la biologie.

Il n'est pas pour autant possible de décrire les phénomènes macroscopiques à partir de ce phénomène fondamental. En revanche, la connaissance des phénomènes électroniques à l'échelle macroscopique est une étape décisive pour aborder les phénomènes de la physique statistique, ceux des relations entre phases, et ceux par lesquels apparaissent des structures, des formes de la complexité.