La plasticité comme thème central de la biologie théorique

Dominique Lambert
Université de Namur, Académie royale de Belgique

A.E.I.S, 7 septembre 2015

Transcription : Alain Cardon, Jean Pierre Treuil

--

Liminaire

Nous nous sommes efforcé de traduire et de respecter au plus près l'exposé du Professeur Dominique Lambert. Mais, comme d'ailleurs les comptes rendus similaires, cette transcription n'engage que ses rédacteurs, en l'occurrence Alain Cardon et Jean Pierre Treuil.

Le professeur Dominique Lambert propose un changement de perspective majeur dans l'approche des Sciences du Vivant. Le problème traité part d'une réflexion sur la notion d'efficacité des Mathématiques dans les sciences et, notamment, en Biologie. La première partie de l'exposé analyse différentes composantes de cette efficacité ; Dominique Lambert indique quelles sont celles en oeuvre dans les Sciences Physiques, et comment elles y assurent une efficacité parfois "déraisonnable"[1] ; puis il s'interroge : ces mêmes composantes se prolongent-elles dans les autres sciences ? La seconde partie concerne spécifiquement le domaine de la Biologie. Dominique Lambert pense que l'objet actuel qui fonde cette science n'est pas le bon et qu'il est fortement réducteur. Il propose un concept - la notion de plasticité - qui permet d'aborder scientifiquement le vivant dans son évolution.

La notion d'efficacité des Mathématiques

L'usage des Mathématiques en sciences permet-il d'améliorer la *compréhension* des phénomènes, ou bien permet-il seulement d'en faire une *description* ? A quel(s) niveau(x) cet usage est-il efficace ? De telles questions renvoient à une réflexion épistémologique.

Une pluralité d'acceptions

Cette réflexion conduit notre conférencier à distinguer plusieurs niveaux d'efficacité :

1. capacité à *décrire* un système, son état et son évolution.
2. capacité à *prédire* ou à "retro-dire" la dynamique d'un système
3. capacité à *expliquer* cette dynamique

Cette distinction repose sur la constatation que l'on peut décrire sans pouvoir prédire (présence d'aléas ou chaos déterministe), que l'on peut aussi décrire ou prédire sans expliquer, et réciproquement. Mais pour faire cette constatation, il faut savoir ce qu'on entend par "expliquer". Dominique Lambert nous en parle en ces termes : expliquer, c'est effectuer un "dévoilement des structures qui permet d'atteindre une compréhension profonde du phénomène", acte rattaché à l'étymologie même du mot (en latin, littéralement

[1] Le conférencier cite à propos de cette expression le physicien (et Prix Nobel) américain Eugène Paul Wigner.

déplier, déployer). Cet énoncé n'est pas tant, dans la bouche du conférencier, celui d'une prise de position épistémologique a priori, que celui du ressenti des physiciens opérant la “mathématisation du réel”. Ressenti que Dominique Lambert fait sien[2] ; par exemple, lorsqu'il évoque la théorie des interactions fondamentales : dire que “L'univers possède, localement, une invariance de jauge, invariance à l'origine de l'existence des interactions physiques”, c'est bien affirmer quelque chose “sur la nature profonde de ces interactions”. Au delà de la simple prédiction des résultats numériques observés dans les détecteurs.

expliquer, engendrer

Mais l'efficacité des Mathématiques, ou plutôt l'efficacité des théories fondées sur les Mathématiques, ne s'arrête pas là. Une efficacité supérieure consiste en la capacité d'une théorie, et des concepts mathématiques associés, à “engendrer de nouvelles idées”. Dominique Lambert cite comme exemple illustre la Théorie de la Relativité Générale. L'efficacité de cette dernière réside, non seulement dans sa capacité à prédire le phénomène des lentilles gravitationnelles, ou la structure de la gravitation, mais aussi dans l'extraordinaire “foisonnement” d'extensions auxquelles elle a donné lieu, avec leur effet catalyseur, le développement d'idées “qui se sont révélées fécondes, souvent bien après”[3].

engendrer, unifier.

Enfin, l'efficacité des Mathématiques réside dans la capacité à révéler la structure commune, à l'oeuvre au sein de phénomènes ou d'objets considérés comme distincts. Autrement dit, c'est l'aptitude de certains concepts - les plus féconds - à représenter l'unité profonde qui se cache derrière des différences de surface. A cette idée d'unification, Dominique Lambert en rattache alors une autre, laquelle sous-tend la suite de son exposé et sur laquelle il reviendra plusieurs fois ; savoir, l'idée que les Mathématiques permettent de définir *l'objet propre d'une discipline scientifique ;* il dira plus loin aussi *les objets* de *son domaine particulier*, *à travers le ou les concepts qui expriment la structure profonde partagée par ces objets, ou les reliant entre eux dans un cadre unifié*. Et de citer le concept de *symétrie* et son utilisation en physique des particules.

la notion d'invariant

Dominique Lambert en arrive alors à définir plus précisément l'objet - ou l'ensemble des objets - d'une discipline comme ceux manifestant certaines propriétés de symétrie : c'est-à-dire un objet ou un ensemble d'objets restant invariants, lorsque soumis aux transformations appartenant à un *groupe* bien spécifié. Il invoque ainsi l'exemple des objets de la *Géométrie Conforme,* invariants dans les transformations du *groupe conforme.* Cette position permet à notre conférencier d'annoncer la thèse qu'il va esquisser à la fin de son exposé ; savoir que les transformations impliquées dans la notion de plasticité et les invariances associées pourraient servir à la définition de ce qu'est l'objet de la Biologie.

---

[2] Dominique Lambert mentionne à propos de ce débat les positions du physicien et chimiste français Pierre Duhem, mort,en 1916. Pour ce dernier “une théorie physique n'est pas une explication…”. Voir l'article de Wikipedia qui lui est consacré.

[3] Notre conférencier cite à ce propos Marie Antoinette Tonnelat et son livre “Les théories unitaires de l'électromagnétisme et de la gravitation” (Gauthiers Villars, 1965)

Des différences d’efficacité entre disciplines

L’appel à la notion d’invariant amène notre conférencier à proposer une hypothèse quant aux raisons qui expliqueraient les différences d’usage des mathématiques entre disciplines scientifiques, et plus largement entre domaines d’activités humaines. Au centre de ces raisons, les «éléments de réalité» concernés par un domaine donné, les transformations qui affectent ces élements en maintenant certaines «régularités» et, enfin, les concepts mathématiques à même de représenter ces transformations et ces régularités.

du côté des sciences humaines

Tous les domaines ne sont pas, du point de vue de l’existence de régularités, dans la même situation. Dominique Lambert cite ainsi le domaine juridique : on a pu imaginer des algorithmes permettant de proposer un jugement, en fonction de règles ou de principes s’appliquant à plusieurs contextes ; mais le rôle d’un juge, précisément, est de pouvoir *transgresser* ces règles pour prendre un arrêt adapté à la particularité d’une situation donnée. Peut-on trouver des régularités dans la transgression de ces règles, régularités que des transgressions d’un niveau supérieur viendraient - éventuellement - à nouveau annihiler ?
D’autres exemples sont mentionnés. Ainsi en est-il de l’ingénierie financière, avec les «robots traders». Contextes dans lesquels la variabilité des situations concrètes, l’apparition de situations non prévues, rendraient nécessaire la transgression des règles que les algorithmes proposent d’appliquer.

Dominique Lambert insiste sur ces contextes, dans lesquels des *acteurs* prennent des *décisions.* Il évoque la théorie des jeux : cette théorie mathématique s’avère apte à décrire les différentes situations pouvant résulter des décisions, *une fois prises* : s’agit-il par exemple d’un équilbre, dans lequel toute autre configuration de décisions prises par les joueurs aurait été globalement moins bonne selon un certain critère ? Mais elle laisse hors de son champ les *mécanismes de prises de décision eux mêmes*, car d’un individu à l’autre, d’un cas à l’autre, ces mécanismes sont soumis à des fluctuations telles que l’existence de régularités - d’origine sociale ou autre - s’avère problématique.

L’importance des *fluctuations* affectant les situations étudiées par les sciences humaines rend difficile la recherche de régularités. Cette pauvreté des régularités donne l’une des limites à l’utilisation des mathématiques dans ces sciences.

du côté des sciences physiques

L’identification d’éléments de réalité se conservant à travers des transformations ne va pas sans la disposition d’un langage apte à rendre compte de ces invariances. C’est l’une des caractéristiques des théories fondamentales de la physique, Relativité et Modèle standard des particules : avoir disposé des théories mathématiques et des formalismes associés - théorie des nombres, des variétés différentielles, des groupes, etc ... capables de représenter les nombreux invariants peu à peu mis au jour par la recherche. Et c’est encore dans le prolongement de ces théories mathématiques que la physique cherche à unifier l’infiniment grand et l’infiniment petit.

Notre conférencier répète encore, pour terminer cette partie de l'exposé, la thèse qui sous-tend ce qu'il va défendre en Biologie : toute discipline scientifique exige un *objet* bien défini ;

Mathématiques et Biologie

Dominique Lambert discerne trois thèses à propos de l'efficacité des Mathématiques en Biologie.

1. les Mathématiques sont efficaces en Biologie, parce que les systèmes étudiés sont contrôlés par des lois, des mécanismes physiques (ou physico-chimiques) : Ces systèmes «ne seraient - en fait - que des systèmes physiques»
2. les Mathématiques sont efficaces en Biologie lorsque les systèmes étudiés se réduisent à des systèmes physiques (au sens précédent) *mais une partie de la Biologie échappe par nature - et définitivement - aux Mathématiques* : c'est, notamment, la partie traitant de l'Histoire du Monde Vivant, Histoire par définition soumise à la «contingence», à l'intervention du hasard ; partie qui est donc une «science historique».
3. les Mathématiques seront réellement efficaces en Biologie lorsqu'on disposera d'une nouvelle approche du monde du vivant, avec de nouveaux concepts biologiques.

Les deux premières thèses sont alors discutées, en particulier à travers plusieurs exemples. La troisième thèse introduira l'exposé de la notion de plasticité.

phénomènes biologiques modélisables par des mécanismes “physiques”

Plusieurs exemples sont présentés. Il est utile de les rappeler, car ils montrent bien la distance entre une modélisation mathémmatique, qui apporte certes un certain éclairage, et les attentes des biologistes.

Le premier exemple concerne la reproduction de la classification des pelages chez les mammifères (les zébrures du zèbre...), dans la lignée de l'application à la morphogenèse des équations de réaction-diffusion. La peau de l'animal est assimilée à une surface sur laquelle agissent des mécanismes modifiant la valeur locale d'une certaine propriété (une couleur par exemple) et tendant ensuite à diffuser cette valeur dans l'environnement proche. L'interaction des effets, ainsi initiés sur toute la surface, finit par produire des *patterns* stables, dont les formes vont dépendre des paramètres contrôlant les mécanismes et des contours de la surface support. *Mais la biologie est en quelque sorte oubliée dans cette modélisation mathématique* ; sur le temps court du développement de l'animal, elle laisse de côté les processus moléculaires sous-jacents ; sur le temps long de l'Evolution, elle n'intégre pas non plus les processus de sélection de ces formes en fonction d'éventuels avantages adaptatifs.

Dans un domaine proche, Dominique Lambert citera un autre cas, celui de « l'apparition de la forme des écailles des machoires du crocodile». Certes, on peut caractériser mathématiquement une telle structure, à l'aide des outils de la géométrie stochastique, éventuellement par le biais d'un processus de genèse purement théorique. Mais rien ne sera satisfaisant, si on ne fait pas le lien entre ce qui n'est qu'une *description* mathématique et les processus *réels,* en oeuvre dans l'émergence de la structure ; lesquels processus réels semblent résider dans des phénomènes de craquèlement, lors de la croissance de l'animal. Si ce lien n'est pas fait, la description mathématique n'est qu'un «placage», sans grand intérêt pour le biologiste.

Le second exemple concerne l'explication d'une particularité morphologique chez les tortues. Le raisonnement est de constater qu'il n'existe qu'une seule position «correcte», permettant à l'animal de vivre normalement. Pour assurer la survie de l'espèce, les individus se trouvant placés suite à des évènements contingents dans une position inadaptée, doivent pouvoir retomber à tout coup dans cette position correcte, et non dans une autre. La morphologie de l'animal ne devrait donc présenter qu'*une seule position stable*, pour éviter tout risque de se retrouver «les pattes en l'air». Encore faut-il que de telles formes corporelles existent. Or les mathématiciens ont pu montrer qu'il en est bien ainsi : ils ont identifés les formes disposant de cette propriété (unicité de l'équilibre stable), et l'on a pu constater que ces formes sont bien, grosso modo, celles de la tortue ! Mais le biologiste peut-il se satisfaire de cette constatation, en l'absence de tout historique des processus darwiniens ayant conduit à cette morphologie, et en l'absence de toute compréhension de la genèse de cette morphologie à partir de l'embryon ?

Le troisième exemple concerne les conformations des brins d'ADN, et la variabilité de ces conformations ; Il s'agit d'un exemple dans lequel, contrairement aux précédents, l'usage des Mathématiques se place au niveau que Dominique Lambert considère comme le plus haut, analogue au niveau dont il a parlé pour la physique fondamentale ; niveau qui capture un aspect de la structure interne de l'ensemble des transformations possibles de l'objet étudié et qui en identifie les invariants. Les transformations en question sont les enroulements et les dépliements que les deux brins entremêlès peuvent subir ; l'invariant considéré est un invariant topologique, somme constante de deux grandeurs, lesquelles peuvent varier.

la biologie, pour partie irréductible aux Mathématiques ?

La seconde thèse met en avant l'idée qu'une part importante de la Biologie échappe aux Mathématiques. La cause en résiderait dans le fait qu'une grande part des dynamiques étudiées ne sont pas du même type qu'en Physique : ce sont des dynamiques *multi-échelles*, relatives à des systèmes *hétérogènes*, et pour lesquelles, très souvent, l'*histoire passée du système* - la trajectoire suivie, les aléas qui ont affectés cette trajectoire - joue un rôle déterminant.

Une objection peut être faite à cette thèse : les physiciens ne fuient pas la confrontation avec l'hétérogénéité. Ils ne fuient pas non plus les questions multi-échelles", comme le montre l'exemple de la physique statistique, ou encore les théories du passage du quantique au classique. L'usage de la *renormalisation* permet ainsi de comprendre comment émerge une propriété macroscopique stable, à partir de configurations microscopiques qui fluctuent constamment ; la renormalisation permet, plus précisément, de calculer pour quelles valeurs des paramètres contrôlant ces fluctuations (comme la température,...) cette propriété macroscopique se modifie brusquement (transitions de phases, phénomènes critiques...).

Pourtant, constate Dominique Lambert, les techniques multi-échelles utilisées en Physique ont été rarement exportées en Biologie. D'ailleurs le peuvent - elles ? Si nous comprenons bien son propos, dans cette thèse, la Biologie paraîtrait ainsi relever uniquement de théories dites "effectives" : chacune de ces théories concerne une échelle donnée (la structure et le fonctionnement de tel type de cellule, la structure et le fonctionnement de la feuille d'un arbre…) ; mais accrocher ces théories effectives à une théorie fondamentale n'est pas possible, et même sans intérêt.

Le concept de plasticité et sa contribution à l'objet des Sciences du Vivants

Dominique Lambert aborde alors la notion de plasticité, et se pose trois questions : S'agit -il d'une notion "fondamentale" ? Est-elle mathématisable ? Révèle-t-elle quelque chose de l'objet spécifique de la Biologie ?

Ces questions se placent dans la ligne de la troisième thèse, pariant sur l'existence de concepts fondamentaux assurant en Biologie la pleine efficacité des Mathématiques. Troisième thèse motivant donc la recherche de tels concepts.

On peut cependant s'interroger : de tels concepts n'existeraient-ils pas déjà ? Seule l'attention qu'il faudrait y porter n'aurait pas été suffisamment importante. Notre conférencier évoque alors les idées de Theodore Vogel[4]. Retenons ici la place accordée aux outils mathématiques dédiés aux systèmes à mémoire, à la présence de délais, d'effets retardés… De tels outils (incluant par exemple les équations différentielles à retard) sont effectivement peu utilisées en Physique fondamentale, mais sont bien connus des ingénieurs. Ces derniers les emploient pour intégrer l'*histoire* des systèmes qu'ils manipulent. Il semble bien que ces outils soient également mobilisés dans l'étude de la dynamique des systèmes biologiques, pris à différentes échelles.

La plasticité, définition.

Dominique Lambert définit la plasticité comme "le lien dynamique entre robustesse et maléabilité" ; autrement dit la capacité d'un système "à maintenir sa cohérence tout en se déformant - de manière réversible ou irréversible - pour s'adapter" aux conditions variables de son environnement. On retrouve cette propriété à tous les niveaux du Vivant, des molécules aux organismes et de ces derniers aux espèces qu'ils constituent. Le premier exemple donné est celui du code génétique, suffisamment robuste pour maintenir à travers le temps une certaine permanence, tout en restant suffisamment maléable pour permettre l'évolution.

Il faut noter que la notion de plasticité est, d'une manière ou d'une autre, présente dans la pensée de nombreux philosophes. Notre conférencier cite notamment Maurice Blondel[5], au côtés de Hegel, Heidegger et Merleau Ponty. Il mentionne également la notion de métamorphose chez Goethe, et l'attention portée par ce dernier aux transformations en

---

[4] idées développées notamment dans son ouvrage "Pour une théorie mécaniste renouvelée", Gauthiers-Villars, 1973. On peut aussi mentionner sa "Théorie des systèmes évolutifs", Gauthiers-Villars, 1965. Théodore Vogel est mort en 1978.
[5] philosophe français, 1861-1949.

oeuvre dans les organes des plantes et aux parentés de formes d'une espèce à l'autre. Métamorphoses donc, dérivant des formes distinctes, "à partir d'une même structure originelle".

La plasticité, sa mathématisation.

La notion de plasticité renvoie à celle de *forme*. Autant la première sous-tend la possibilité d'une modification, autant la seconde évoque un caractère figé, surtout dans son *acception aristotélicienne*[6]*.* Nécessité donc de disposer d'une notion de forme "fluente", capable de se transformer, et des outils mathématiques capables de représenter ces transformations, tout en rendant compte des invariants qu'elles préservent.

Un des premiers à avoir proposer des idées en ce sens est le biomathématcien écossais d'Arcy Thompson[7]. Mais au delà de cet apport, notre conférencier évoque deux domaines mathématiques très actuels, la topologie et la géométrie différentielle d'une part, la théorie des graphes (ou des réseaux) d'autre part.

La topologie et la géométrie différentielle. Ces théories fournissent les outils aptes à décrire des *transformations continues* d'objets étendus, de formaliser les lois de ces transformations, d'identifier les différents types d'invariants possibles. Dominique Lambert donne l'exemple de la physique des *liposomes.* Au coeur de cette "physique", une structure géométrique évolue vers un état d'énergie minimale à travers une modification de la courbure moyenne, la surface et le volume de la structure restant inchangés.

La théorie des graphes ou des réseaux. Les transformations en jeu sont alors *discontinues,* comme la suppression d'un noeud du réseau, la rupture d'un lien, ou au contraire l'apparition de nouveaux liens, voire de nouveaux noeuds. Ces théories sont aptes à définir des propriétés structurelles du réseau en tant que tel[8], à caractériser les mécanismes contrôlant ses transformations, à identifier enfin les invariants éventuels. Le lien avec la biologie est alors le suivant : une fois le système étudié[9] décrit par un réseau, quelles sont les propriétés structurelles, associées à telle fonction biologique ; quels types de transformations, en préservant les propriétés structurelles du réseau, maintiendront cette fonction ? Au contraire, quels types de transformations la feront disparaître ?

Une notion commune à ces deux approches est la notion de *paysage énergétique*, lequel, comme tout paysage doté de reliefs, comporte des vallées et des crêtes, des bas fonds et des cols. Chaque configuration d'une forme ou d'un réseau est assimilée à un point de la surface de ce paysage. Les transformations observées - déformation continue de l'objet ou restructuration progressive du réseau - sont alors expliquées par le repérage d'un certain

---

[6] acception qui fait de la forme d'une espèce une des caractéristiques de son identité. Deux formes différentes sont, chez Aristote, celles de deux espèces différentes. Une telle acception exclut par construction les métamorphoses et l'évolution.

[7] D'Arcy Wentworth Thompson, 1860-1948. Qualifié par Wikipédia de "premier biomathématicien". Sa pensée est concentrée dans son ouvrage *On Growth and Form*, 1917, révisée 1942. Voir sa traduction française Forme et Croissance, Seuil, collection "Science ouverte", 2009.

[8] comme par exemple, à un niveau élémentaire, le nombre moyen de liens par noeud, le nombre de liens nécessaires pour aller d'un noeud à un autre, etc

[9] Dominique Lambert évoque ici comme exemples l'organisation d'un génome, ou encore le réseau des interdépendances entre réactions chimiques au sein d'une cellule.

chemin, d'une certaine “canalisation” dans ce paysage, conduisant le système de son point de départ initial à un “point bas” final. Dominique Lambert cite à ce propos le biologiste anglais Conrad Hal Waddington, et ses travaux sur la différenciation cellulaire, lors du développement de l'embryon. Le processus conduisant une cellule de son état indifférencié à son état définitif y est, en effet, modélisé par un chemin tracé dans un paysage “épigénétique”[10].

D'autres exemples sont mentionnés par notre conférencier, tel le folding des protéines et la maléabilité des structures neuronales. Pour conclure que oui, nous disposons bien des outils mathématiques aptes à décrire la plasticité.

pour conclure, la plasticité, quel intérêt pour le biologiste ?

Dominique Lambert revient dans sa conclusion sur cette question au centre de sa réflexion. Il rappelle d'emblée qu'il n'est pas biologiste, et que donc sa réponse résulte essentiellement d'une intuition basée sur son expérience de physicien et de philosophe.

Il reprend donc son raisonnement : l'objet de la physique fondamentale est le “support d'invariants”, sous des groupes de transformations bien identifiés ; de même, l'objet des sciences du vivant pourrait être, fondamentalement, le support des transformations et des invariants impliqués dans la notion de plasticité. Un objet par essence *évolutif*, susceptible de métamorphose, cette dernière comprise comme la dynamique d'une “forme fluente” et non comme une succession de formes distinctes[11]. On serait alors proche - c'est notre interprétation personnelle des propos du conférencier - d'une définition large de ce qu'est un système vivant, au delà des processus physiques particuliers incarnant ces propriétés sur notre planète.

Son idée lui semble d'autant plus argumentable que les outils mathématiques nécessaires sont, selon lui, tout à fait disponibles ; Ces outils donneraient à l'utilisation des mathématiques dans les sciences du vivant un rôle, un *statut*, largement supérieur à celui qu'elles ont actuellement. Certes, pas de “placage” : les outils mobilisés en Physique (transformations ponctuelles, groupes de Lie) sont ici insuffisants ou même inadaptés. Notre conférencier rappelle les domaines des Mathématiques qui lui paraissent potentiellement féconds, notamment la topologie ; il en évoque - dans cette fin d'exposé - quelques extensions, telle la *théorie des faisceaux*.

En conclusion, insister sur la notion de plasticité a pour notre conférencier au moins le mérite de “casser” cette notion de forme figée d'origine aristotélicienne, et d'ouvrir la voie d'une définition “théorique” de l'objet des sciences du vivant.

Discussion

De très nombreuses questions ont été posées au conférencier, montrant l'intérêt pour ses positions novatrices :

---

[10] on pourra consulter sur ce point l'[article de Wikipédia](#) (version anglaise) consacré à Waddington.

[11] ce - nous semble-t-il - même si peuvent apparaître des ruptures, des discontinuités, qui rappeleraient les changements de phase, les brisures de symétrie affectant les objets de la Physique.

1- Une première intervention interroge sur “l’objet des Mathématiques”, et revient sur la source de leur efficacité. L’intervenant prend l’exemple de la forme héxagonale des alvéoles d’une ruche. Il estime que la raison de cette forme, savoir une optimisation de l’occupation de l’espace sous certaines contraintes, est accessible à l’intuition. Certes, on peut en faire une démonstration mathématique, mais celle çi n’a pas un grand intérêt, puisqu’en somme, tout le monde comprend et ce, depuis “les babyloniens”. En physique de l’infiniment petit par contre, l’intuition tirée des expériences à notre échelle de perception est totalement impuissante, seules les Mathématiques peuvent fournir les supports d’une intuition élargie, et donc d’une compréhension. On retrouve cet état de fait dans le domaine biologique, dans la compréhension des processus de repliement des protéines, ou dans la compréhension du fonctionnement des systèmes neuronaux. Pour cet intervenant, c’est d’abord là que réside le coeur de l’utilité des Mathématiques.

Dominique Lambert reprend cette observation, en soulignant qu’effectivement le langage mathématique est support d’intuition. Le mathématicien “voit” les objets qu’il manipule, et cette vision le guide dans sa recherche et sa découverte des propriétés attachées à ces objets. Le calcul formel vient en second lieu, pour confirmer l’intuition. Reste la question du “statut” de l’objet mathématique étudié et de ses propriétés, de son indépendance par rapport au fonctionnement de l’esprit humain.

Concernant l’exemple des alvéoles, le conférencier fait remarquer que la description mathématique en terme d’optimisation capture un aspect intime du processus physique de construction. Aussi bien cette description mathématique, peut-être superflue dans ce cas, révèle t-elle une “efficacité” de même nature que celle présente dans des contextes beaucoup moins “intuitifs”.

2- Un second intervenant revient sur la notion de plasticité, et sur son emploi dans l’analyse des transformations actuelles affectant nos sociétés. Les propos du conférencier sur les “Mathématiques de la plasticité” l’amènent à évoquer “la plasticité des Mathématiques”. Et plus généralement la plasticité des transformations affectant les théories scientifiques. Cet intervenant pense que, fondamentalement, l’histoire des Sciences n’est pas une séquence de “révolutions” au sens de Kuhn, faisant se succéder des “paradigmes” mutuellement incommensuraux. Cette histoire, au contraire, est le fruit de processus continus conservant sur le long terme certains invariants, en les réaménageant dans le sens d’une adéquation croissante ; une histoire des Sciences donc, analysable à partir de la plasticité. Cette caractéristique de la dynamique scientifique serait même un contre-poids utile, pour mieux affronter les “ruptures” - technologiques, sociétales - que nous vivons actuellement.

3- Un autre intervenant questionne le sens du terme “efficacité”, en soulignant qu’il est, dans le cas qui nous occupe, la traduction du terme anglais “effectivness”. Or, effectivness a un sens plus précis que le terme français correspondant. Il renvoie à la notion d’adaptation, à la capacité “d’avoir prise sur un objet”, en l’occurrence les sciences de la nature. L’*effectivness* des Mathématiques ne résiderait-elle pas alors dans leur propre plasticité, déjà évoquée dans l’intervention précédente ?

Dominique Lambert reprend alors ce thème de la plasticité des Mathématiques. Il évoque les instruments à même de rendre compte de cette plasticité, savoir les concepts attachés à la *Théorie des Catégories* : concepts[12] qui formalisent les liens pouvant exister entre structures mathématiques, appartenant a priori à des domaines différents ; concepts, qui à partir du décryptage de ces liens, exhibent une structure commune "profonde" sous-jacente.

4- Le même intervenant rebondit en demandant au conférencier ce qu'il entend par "Mathématiques profondes". En fait, répond-il, les notions mathématiques "les plus intéressantes" sont celles qui entretiennent le plus de liens avec celles d'autres domaines mathématiques, pour former une sorte de "communauté" dont les membres se fécondent mutuellement. Ainsi a-t-on pu parler (Jean Dieudonné) de Mathématiques *significatives* et de Mathématiques *vides*, ces dernières intéressantes seulement dans le domaine spécifique pour lequel elles ont été construites. D. Lambert mentionne ainsi la significativité des réels, des complexes, des quaternions et des octonions, pour souligner la "perte de richesse", lorsque l'on passe par la même procédure à des complexités supérieures.

5- Une intervention concerne les relations entre plasticité et informatique. Mention est faîte des *systèmes multi-agents,* du moins de ceux qui mettent en oeuvre des centaines de milliers d'agents interagissant, qui ré-écrivent constamment leurs relations mutuelles, en s'adaptant aux variations de l'environnement. De tels systèmes sont représentables à chaque instant par des réseaux de très grande taille. L'analyse que l'on peut en faire est d'ordre topologique (ou "morphologique"). Il faut alors essayer de comprendre la manière dont cette morphologie se transforme et ses invariants ; ici encore, on est confronté à une dynamique caractérisée par une très grande plasticité. Cette intervention renvoie aux propriétés des systèmes complexes, et à leur aptitude à faire *émerger* dans leur organisation des formes macroscopiquement stables temporairement, au dessus des continuelles variations microscopiques sous-jacentes. On retrouve à propos de tels systèmes ce que Dominique Lambert a nommé la "plasticité verticale", associée au changement d'échelle et à la renormalisation.

6- Une discussion se développe alors autour de la difficulté des biologistes à décaler leur regard, et admettre que l'on peut faire de la science en dehors de l'étude des mécanismes moléculaires. Cette réticense a peut-être ses racines dans la crainte d'un retour au "vitalisme" , ou encore dans celle provoquée par certains excès résultant d'une utilisation abusive de la Théorie des Catastrophes. Mais force est de constater la capacité explicative de notions liées à des échelles moins fines que l'échelle moléculaire ; mention est faite par exemple de la notion de viscoélasticité en morphogénèse ; mention encore de la notion de "fatigue", de la pertinence de son intégration dans les équations de la dynamique d'un système.

7- Une dernière intervention revient sur la manière très "aristotélicienne" dont on décrit traditionnellement le développement d'un embryon ou d'un animal ; manière distinguant différents "stades" bien identifiés. Le cinéma a changé la donne, puisqu'il permet de suivre

[12] Notre conférencier mentionne ainsi les "foncteurs adjoints", matérialisant les relations "dialectiques" entre deux théories mathématiques ; ces relations engendrent un éclairage mutuel, chacune des théories venant enrichir la compréhension et la fécondité de l'autre.

une dynamique de façon continue dans le temps. La dynamique des formes apparaît comme relevant d'un "écoulement continu" avec, cependant,, des "temps de discontinuités", des changements extrèmement rapides**,** souvent liés à des *non-linéarités d'origine physique.* Toutefois, l'intervenant souligne que tout ne peut être expliqué par de simples modifications sous contraintes[13] des formes d'un corps viscoélastique restant homogène du point de vue de sa composition cellulaire. Force est de faire intervenir un processus que l'on peut considérer comme "non-physique", au moins à cette échelle : le processus de *différenciation cellulaire.* La discussion se poursuit sur une question générale, celle des rapports entre un processus purement géométrique de transformation de la forme d'un corps initialement homogène et un processus "de construction des matériaux" organisant ce même corps en différents tissus ou organes différenciés ; plus précisément sur deux questions : celle du moment où ces processus entrent en action, interviennent-ils parallèlement ou sinon dans quel ordre ? celle des déterminismes à l'oeuvre, essentiellement de nature physique pour le premier processus, de nature biochimique dans le second.

-.-

[13] contraintes liées à la croissance et à l'environnement