

JALONS

Alain GRUMBACH*

A propos d'émergence. Emergence... ou... explication

Ce texte, qui appartient au dossier "Explication et émergence", est publié ici dans la rubrique "Jalons" à la demande de l'auteur.

PROLOGUE

Dans le contexte de ce dossier consacré à "Emergence et Explication", ce jalon porte quasi exclusivement sur la notion d'émergence. Son objectif est d'apporter un éclairage relatif à ce "phénomène" complexe. Le sens commun a introduit le concept d'émergence pour qualifier certains phénomènes naturels. Par ailleurs, depuis quelques années, ce concept prend une importance certaine dans les sciences du vivant, de la cognition, en intelligence artificielle. Mais rares sont les aventuriers qui se risquent à le définir. C'est la raison pour laquelle nous pensons qu'une réflexion relative à la notion d'émergence, en tant que telle, peut être utile à ce dossier.

Après l'évocation de quelques exemples typiques de phénomènes d'émergence, nous tentons d'explicitier les points communs entre ceux-ci de façon à élaborer un ensemble de traits caractéristiques de l'émergence. Un de ces traits majeurs est la notion de niveau d'organisation. Ce point essentiel est approfondi à travers une description intuitive qui prend appui sur la théorie des ensembles. A la lumière de cette réflexion, le jalon se termine par quelques mots justifiant son titre : "Emergence ou Explication" que nous comparons à "Emergence et Explication", titre de ce dossier.

ACTE 1. EXEMPLES D'EMERGENCE

Ce premier acte est consacré à la description du concept d'émergence à partir d'un point de vue en extension s'appuyant sur un ensemble d'exemples que nous pensons typiques de phénomènes d'émergence.

Considérons trois exemples :

* ENST Dépt. INF, 46 rue Barrault - 75634 PARIS Cedex 13
E-mail : grumbach@enst.fr

- image de ... ;
- pont de fourmis ;
- phénomène économique.

1.1 Image de ...

Le premier exemple est illustré par une photographie (R.C. James), sur laquelle on aperçoit des tâches noires sur fond blanc, ... et après un certain temps, subitement ... un chien dalmatien, penché vers le sol.

1.2 Fourmis

Le deuxième exemple est celui de la fourmilière, de la termitière, ou encore d'un pont de fourmis illustrant des propos de Hofstadter (Hofstadter 80). Un pont entre deux branches est formé par des corps de fourmis.

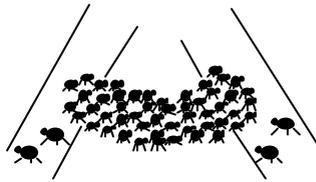


Figure 1
Pont de fourmis

1.3 Phénomène économique

Le troisième exemple met en scène des acteurs économiques (agents humains), agissant à un niveau micro-économique, qui engendrent des phénomènes macro-économiques. L'agent, avec ses objectifs individuels, locaux, est le facteur de l'évolution économique, des phénomènes correspondants, mais il ne peut prévoir les conséquences globales, ni les contrôler.

Après ce point de vue en extension, essayons de formuler une description en intension de la notion d'émergence.

ACTE 2. CARACTERISATION DE L'EMERGENCE

De nombreux auteurs ont déjà abordé ce sujet : Lewes G.-H., Atlan H., Hofstadter D., etc. On pourra en particulier, trouver une synthèse bibliographique effectuée par Kampis G. dans (Kampis 91)

citant Cariani P., Forest S., Langton C., Rosen R., etc., ou par Clark A. (Clark 95).

Commençons par une définition ancienne, qui reflète relativement bien notre intuition de la chose. Lewes G.-H. propose une description de l'émergence en ces termes :

“théorie selon laquelle la combinaison d'unités d'un certain ordre réalise une entité d'ordre supérieur dont les propriétés sont entièrement nouvelles”
(Lewes G.-H. 1874)

Lewes illustre sa définition par le cas de l'eau. Les propriétés des gaz qui la composent ne laissent pas prévoir celles de l'eau (et réciproquement).

2.1 Traits caractéristiques

A travers les différents exemples évoqués à l'acte 1, la notion d'émergence apparaît caractérisée par les traits suivants :

- a. des acteurs : agents interactifs dotés de capacités de :
 - *perception locale* ;
 - *action locale* ;
- b. des spectateurs : une (ou plusieurs) entité sensible au phénomène émergent :
 - *perception globale* ;
- c. une unité d'action (et de lieu) : le phénomène est décomposé en :
 - * un état initial, caractérisé par un *niveau d'organisation initial* N ;
 - * une séquence d'événements, aboutissant à ;
 - * un état final, introduisant un *nouveau niveau d'organisation* N' ;
- d. une unité de temps : durée du phénomène compatible avec les échelles temporelles des acteurs et des spectateurs.

Détaillons ces points. Prenons l'exemple du pont de fourmis.

- a. Les agents sont les fourmis, qui sont capables :
 - de percevoir leur environnement immédiat ;
 - d'agir localement.
- b. La notion d'entité sensible au phénomène émergent, n'est pas aussi simple qu'elle peut le paraître de prime abord. Le caractère émergent d'un phénomène consiste en le point de vue d'un observateur sur un phénomène ; ce n'est pas une caractéristique intrinsèque du phénomène, mais une propriété associée à la situation globale *observateur* +

phénomène (sens commun). Une première entité exerçant la fonction d'observateur est celle qui constate la formation du phénomène émergent ; par exemple l'humain qui observe le pont de fourmis. Mais cet observateur se situe sur un plan méta, dans la mesure où il n'est concerné que par l'étude de la situation, et non la situation elle-même. Nous souhaitons introduire une autre entité sensible au phénomène émergent, et pour laquelle l'existence du phénomène est importante, critique (voire vitale), qui est donc partie prenante de la situation ; désignons cette entité par : l'"intéressé". Dans la cas du pont de fourmis, l'intéressé est la colonie de fourmis. Pour bien marquer la différence entre l'observateur et l'intéressé, notons que de nombreux ponts de fourmis émergent dans la nature sans qu'il y ait présence d'observateur. En revanche, ces ponts existent toujours pour améliorer les conditions de vie (voire préserver la survie) d'une colonie de fourmis, l'intéressée.

c. Les deux niveaux d'organisation intervenant sont :

- niveau de chaque fourmi ;
- niveau de la structure de pont de fourmis.

d. Enfin l'échelle temporelle est de l'ordre de la minute.

Nous pouvons de la même manière observer les autres exemples proposés. Le tableau ci-après résume l'analyse des différents exemples suivant les traits mis en évidence. Les deux premières colonnes indiquent les deux niveaux d'organisation ; puis apparaît l'échelle temporelle ; enfin les trois dernières colonnes décrivent les agents associés à chacune des trois fonctions nécessaires à l'apparition du phénomène émergent.

caract. exemples	niveau N	niveau N'	échelle tempor.	percept. locale	action locale	percept. globale
chien dalmat.	point	concept	seconde	récepteur	neurone	sujet
pont fourmis	fourmi	pont	minute	fourmi	fourmi	colonie
syst. économ.	opérat. micro	évolut. macro	heure	agent	agent	agent

Tableau 1

Synthèse des exemples d'émergence considérés avec leurs caractéristiques

L'exemple du chien dalmatien n'est pas aussi immédiat qu'il peut apparaître à première vue (!). En effet, on distingue mal l'aspect dynamique du phénomène. Dans ce cas, ce n'est pas l'entité de l'environnement qui est dynamique, mais le processus de perception de l'observateur. Ainsi la fonction de perception locale est réalisée par les récepteurs visuels, celle d'action locale par les neurones, celle de perception globale par le sujet qui observe l'image du chien.

2.2 Traits différentiels

Après cette étude de points communs caractérisant la notion d'émergence, il peut être intéressant d'expliciter des aspects différentiels. Nos trois exemples de base se différencient dans le tableau, en particulier par le biais des paramètres : perception locale, action locale, action globale. Dans le cas de l'image du chien dalmatien, les trois agents remplissant ces fonctions sont différents ; dans le cas des fourmis les deux fonctions locales sont assurées par le même agent ; dans le cas de l'économie, le même agent remplit les trois fonctions. A ces différents cas, on pourrait penser attacher des catégories d'émergence :

- *émergence faible* dans les deux premiers cas : fonction de perception globale réalisée par une entité différente de celle qui réalise les fonctions locales ;

- *émergence forte* dans le dernier cas : fonction de perception globale réalisée par la même entité que celle qui réalise les fonctions locales.

ACTE 3. NOTION DE NIVEAU D'ORGANISATION

C'est aussi le problème de l'émergence des propriétés nouvelles à un niveau d'intégration dans un système organisé alors que ces propriétés n'étaient pas observées — et que rien ne permettait de les prévoir — à un niveau d'intégration moindre, par exemple à celui des éléments constitutifs.
(Atlan 83)

Cette caractérisation de l'émergence proposée par Atlan repose sur celle de niveau d'organisation, qui apparaît comme un aspect fondamental. Etudions-la.

3.1. Entités faisant l'objet d'une décomposition en niveaux

Dans les travaux participant de la Science de la Cognition, le paradigme de "*niveau d'organisation*" est très souvent utilisé. Son existence est directement liée à la démarche scientifique cartésienne procédant par décomposition. Une seconde raison en est l'usage très répandu actuellement du paradigme système de traitement de l'information, qui s'accorde parfaitement avec celui de niveau d'organisation.

Commençons par quelques exemples de structuration en niveaux d'organisation. Ce paragraphe a pour objectif essentiel de montrer le foisonnement, la variété des observables, plus que d'amener à la compréhension précise de chacun.

Les entités faisant l'objet d'une décomposition en niveaux sont très diverses, depuis des objets simples, jusqu'à des phénomènes complexes :

- un livre, organisé en chapitres, paragraphes, phrases, mots, lettres, etc. ;
- le corps humain organisé en molécules, cellules, organes, systèmes ;
- une unité de traitement ; ex : moteur, téléviseur, ordinateur, être vivant ;
- un ensemble d'objets, d'unités de traitement, d'organismes : société, colonie.

Remarquons déjà que parmi ces entités certaines sont statiques, atemporelles (n'évoluent pas), d'autres évolutives, certaines fermées (sans interaction avec un environnement), d'autres interactives.

Dans la suite nous utiliserons le terme "phénomène" (englobant abusivement "objet") pour désigner l'entité faisant l'objet d'une décomposition en niveaux d'organisation.

3.2. Notions caractéristiques

Après cette vision en extension, essayons d'extraire les points communs à la majorité des exemples évoqués.

A travers ces exemples, l'expression "niveaux d'organisation" évoque des notions telles que :

- pluralité : plusieurs niveaux ;
- existence d'une loi de composition entre entités d'un même niveau n , formant les entités du niveau $n+1$;
- relations (isomorphisme, hiérarchie, etc.) entre les niveaux ;
- incompressibilité : impossibilité de supprimer un niveau pour passer directement du niveau n au niveau $n+2$;
- autonomie : une certaine indépendance entre les niveaux, base de la décomposition ; existence de propriétés, de relations, de lois de comportement, caractérisant les entités d'un niveau, indépendamment des autres niveaux.

3.3. Synthèse

Les notions explicitées ci-dessus peuvent être synthétisées en termes ensemblistes sur le schéma suivant :

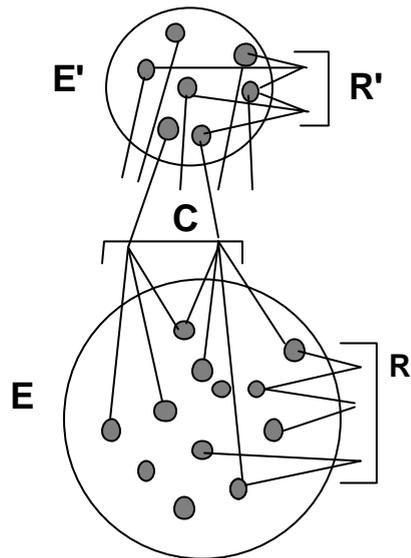


Figure 2

Point de vue ensembliste sur la notion de niveaux d'organisation

E est un ensemble d'éléments e ;

C est une loi de composition externe de certaines suites (finies) de E ;

E' est l'ensemble image de E par C ;

R est une relation (potentielle) sur E^n ;

R' est une relation (potentielle) (éventuellement unaire) sur E'^n .

On dira que $\{E', R'\}$ est un niveau d'organisation s'il existe une relation R' sur E'^n qui ne peut s'exprimer sous forme de relations R sur E^n .

Par exemple, E peut être l'ensemble des lettres de l'alphabet, E' celui des mots, C la loi de composition associant à une séquence de lettres le mot correspondant, R' la relation de séquençement de mots dans une phrase (suivant des règles syntaxiques, sémantiques), qui ne peut être exprimée à partir de relations sur l'ensemble E des lettres.

Par "contre-exemple", considérons comme ensemble E l'ensemble des entiers naturels de 1 à 10, comme relation R la relation d'ordre sur les entiers, restreinte à E , comme loi C l'addition de 10, comme ensemble E' l'ensemble des entiers naturels de 11 à 20. Si l'on considère la relation d'ordre R' sur les entiers, restreinte à E' , l'information contenue dans R' peut être déduite de R : $x' R' y'$ si et seulement s'il existe x et y de E tels que $x' = C(x, 10) = x + 10$, $y' = C(y, 10) = y + 10$, et $x R y$. Dans ce cas, on ne parlera pas de $\{E', R'\}$ comme d'un nouveau niveau d'organisation.

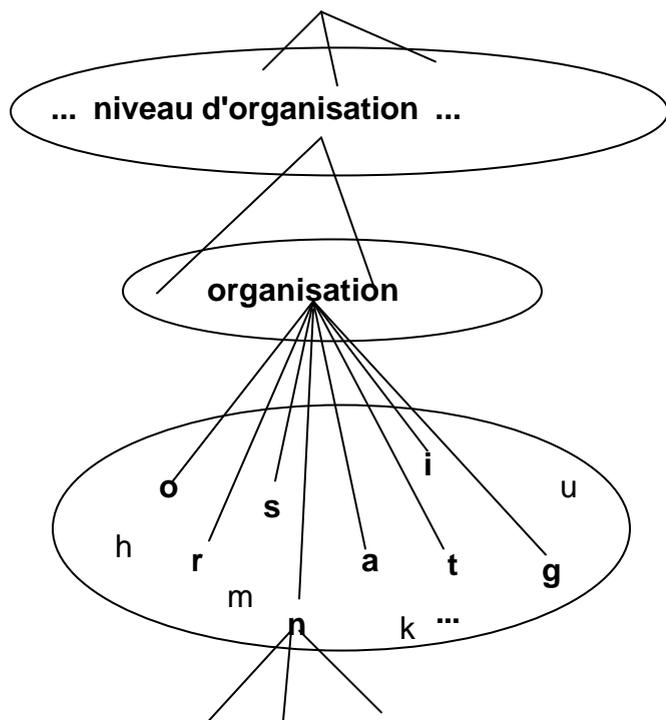


Figure 3
Exemple de niveaux d'organisation

Les notions de base sous-jacentes à celle de niveau d'organisation, évoquées ci-dessus, se retrouvent dans la définition proposée :

- pluralité : deux ensembles E et E' ;
- relations entre les niveaux, loi de composition : C ;
- autonomie, régularités, lois de comportement propres : relations R, R'.

Retournant à la notion d'émergence, on peut identifier les niveaux d'organisation correspondant à chaque exemple d'émergence (niveaux séparés par "/") :

- image de chien dalmatien : point (position, couleur) / percept de chien dalmatien ;
- pont de fourmis : fourmi (position, dimensions) / pont ;
- économie : opération micro-économique (instant, achat, vente, montant) / évolution macro-économique.

ÉPILOGUE

Comme nous l'avions évoqué en introduction, notre point de vue concernant le couple émergence-explication peut se résumer dans l'expression "Emergence OU Explication" le "ou" étant exclusif. En effet le caractère émergent a été décrit comme une propriété d'un phénomène se produisant dans un domaine, propriété perçue par un observateur. L'explication quant à elle, interviendrait non pas dans le domaine, mais dans un espace symbolique représentant le domaine, une théorie du domaine. Dans cet espace symbolique, l'explication apparaîtrait comme un énoncé permettant de mettre en relation de causalité les différents constituants du phénomène. A l'opposé, notre perception du phénomène émergent se limite à ses manifestations, sans laisser place à une compréhension profonde des liens entre tenants et aboutissants. Nous ne sommes pas loin de penser qu'une telle compréhension nuirait à la qualité d'émergence. En effet suivant en cela l'acception de A. Clark (Clark 95), une telle compréhension irait à l'encontre de variables non contrôlées. Ceci est explicite dans le cas des agents économiques : s'ils disposaient des explications des phénomènes macro-économiques, il n'y aurait plus d'émergence (et même plus de système économique de ce type). Prolonger cette idée dans le cas des fourmis se traduit par l'hypothèse qu'il n'y a pas de fourmi-architecte qui, en suivant un plan précis, commanderait les autres fourmis pour réaliser la tâche de construction du pont.

A première vue, nous considérons ainsi émergence et explication dans une relation d'opposition. Une étude plus fine permettrait peut-être de considérer ces deux concepts comme caractérisant deux points de vue successifs sur un même phénomène. Mais cela est une autre histoire ...

Pour conclure sur un plan *métaphysique*, nous pourrions nous poser la question : existe-t-il une organisation supérieure émergente, dont chaque humain serait un élément du niveau inférieur (jouerait le rôle d'une fourmi), et ne disposerait pas de la fonction d'observation globale ? ... *Qui serait, dans ce cas, l'observateur global ? ...*

caract exemples	niveau n1	niveau n2	échelle tempor.	percept. locale	action locale	percept globale
pont fourmis	fourmi	pont	minute	fourmi	fourmi	colonie
?	humain	?	?	humain	humain	?

Tableau 2
Extrapolation métaphysique du tableau 1

Je tiens à remercier Cédric Chappelier, Jean Louis Dessalles et Eric Bonobea pour les passionnantes discussions qui ont facilité l'émergence de ces réflexions.

Bibliographie

Atlan 83

Atlan H. (1983), L'émergence du nouveau et du sens dans : *l'Auto-organisation*, Colloque de Cerisy

Bonabeau 92a

Bonabeau E. (1992), Conceptions de l'émergence, Actes Workshop *Emergence dans les modèles de la cognition*, Paris, ENST

Bonabeau 92b

Bonabeau E. (1992), Complexité, information mutuelle, émergence, Actes Workshop *Emergence dans les modèles de la cognition*, Paris, ENST

Clark 95

Clark A. (1995), Happy couplings : emergence and explanatory interlock, In : M. Boden ed., *Oxford readings in the philosophy of artificial life*, Oxford University Press

Dessalles 92

Dessalles J.-L. (1992), La perception de l'émergence, Actes Workshop "Emergence dans les modèles de la cognition", Paris, ENST

Grumbach 94

Grumbach A. (1994), *Cognition Artificielle, Du réflexe ... à la réflexion*, Addison Wesley

Kampis 91

Kampis G. (1991), Emergent computation, life and cognition, *World futures*, vol 31, Gordon and breach science publishers SA

Lewes 1874

Lewes G.-H. (1874), Théorie de l'émergence, Relation de l'émergence et de l'évolution de l'espèce, de la pensée

Giuseppe LONGO** — *Géométrie, Mouvement, Espace : Cognition et Mathématiques*, à partir du livre *Le Sens du Mouvement* de Alain Berthoz, Odile Jacob, 1997.

«La perception n'est pas une représentation : c'est une action simulée et projetée sur le monde. La peinture n'est pas un ensemble de stimuli visuels : c'est une action perceptive du peintre qui a traduit, par son geste, sur un support contraignant, un code qui évoque immédiatement, non pas la scène représentée mais la scène qu'il a perçue. La peinture nous touche parce qu'elle reproduit à l'envers le miracle des images de Lascaux. Je regarde le tableau à la place du peintre qui a projeté son activité mentale. Le génie est celui qui me guide à percevoir comme lui.» [A.B., p. 147].

Le livre d'A.B. (Alain Berthoz) est tout d'abord une analyse de la cognition humaine du point de vue de "l'action du corps, avec son cerveau, dans le monde" ; pour A.B., même la perception est une action simulée [p. 17]. *Anticiper, deviner, parier* : voilà le fondement et le paradigme quotidien situé au coeur de notre "praxis" et, en fait, de notre intelligence ; cette intelligence qui trouve son origine dans l'évolution des espèces, dans la phylogenèse, mais aussi dans notre histoire humaine et dans l'ontogenèse (la formation de l'individu). Le pari est de trouver par ce même parcours le *fondement* et non pas seulement l'origine, ajoute le mathématicien que je suis, de la plus "conceptuellement stable" de nos tentatives de description du monde : les mathématiques. J'essaierai d'esquisser cette thèse, tout en analysant ce livre très intéressant et, pour ce que je peux dire dans mon expérience bien moindre en neurophysiologie, très original.

1 - PREMISSE : POINCARÉ ET LE FORMALISME.

«Localiser un objet en un point quelconque signifie se représenter les mouvements (c'est-à-dire les sensations musculaires qui les accompagnent et qui n'ont aucun caractère géométrique) qu'il faut faire pour atteindre cet objet» ... «Un être immobile n'aurait jamais pu acquérir la notion d'espace puisque, ne pouvant corriger par ses mouvements les effets des changements des objets extérieurs, il n'aurait

** LIENS (CNRS) et Dépt. de Mathématiques et Informatique, Ecole Normale Supérieure, Paris
E-mail : longo@dmi.ens.fr

eu aucune raison de les distinguer des changements d'état». Ces deux citations de Poincaré marquent le début du livre de A.B. [p. 44] : il n'y a pas une théorie géométrique *a priori* du monde, donnée par une axiomatique formelle. C'est plutôt la présence des corps, les «solides naturels» et notre propre corps, notre mouvement et les changements d'état qui constituent l'espace et qui nous le font appréhender ; les axiomes ne sont que «des définitions déguisées», dont on choisit les «plus commodes» [Poincaré, 1902, p. 75-76].

Je partage entièrement l'enthousiasme de A.B. pour Poincaré, ce mathématicien de génie, toujours à redécouvrir : son analyse du "problème des trois corps" (1880-85) a bouleversé la physique laplacienne (et sa philosophie), mais il fallut attendre l'école russe des années '30 et '60, et puis les années '70 en France et aux USA, pour que les esprits acceptent de dépasser l'hypothèse du déterminisme et de la connaissance "*décidable et complète*" du monde physique que, selon Laplace, les mathématiques fourniraient. Les remarques, très informelles et incomplètes, de Poincaré sur les fondements des mathématiques, de la proprioception de l'espace à la nature de l'induction arithmétique sont tout aussi importantes et profondes, mais, selon moi, elles n'ont pas reçu l'attention qu'elles méritent, car elles ont été balayées par la rigueur mathématique de la Logique Mathématique de Frege et Hilbert, en particulier par ce sens de l'indépendance de la construction mathématique de toute signification que l'école hilbertienne a su nous donner : le fondement et la certitude sont dans la manipulation de règles de déduction finitaires sans signification et dans la preuve de leur cohérence formelle. (Une règle est une suite de symboles avec une structure syntactique "bien formée", en hypothèse, et une autre suite de symboles bien formée en tant que conséquence ; le passage des hypothèses aux conséquences est purement mécanique : des hypothèses "A" et "A ? B" on déduit "B" sur la base seulement de la *forme* de ces suites de symboles, indépendamment de toute signification.)

Par ces moyens, une axiomatique logico-formelle et ses règles de déduction, Hilbert visait à fournir un cadre formel "*décidable et complet*" (et dont la cohérence peut être démontrée) pour les mathématiques : à partir de l'Arithmétique, la déduction formelle aurait dû permettre de décider toute proposition mathématique. L'hypothèse de Laplace, entre mathématiques et physique, est donc reprise par Hilbert, au niveau du rapport entre *métamathématiques* et mathématiques : les systèmes formels doivent "recouvrir

complètement" les mathématiques comme les mathématiques laplaciennes aurait dû "recouvrir complètement" le monde physique. Et le siècle en a été marqué : la rigueur mathématique coïncide avec la "rigueur formelle" (la possibilité, même seulement à l'état potentiel, d'un cadre axiomatique et d'une déduction purement formelle certifie la correction de tout théorème) ; la géométrie devient algèbre, si elle est possible sans référence à l'espace ; le langage ainsi formalisé, détaché de son *sens* (géométrique, en particulier), permet d'inventer, à partir des années '30, des "machines pour déduire", pures manipulatrices de symboles sans signification (ces ordinateurs digitaux qui ont changé notre vie). L'invention de ces machines est une conséquence extraordinaire d'idées remarquables, accompagnées parfois par une hypothèse philosophique qui n'est pas nécessaire pour ces développements, mais qui a eu un très grand succès : *toute* l'intelligence humaine est "logico-computationnelle", ou peut être reproduite par une machine qui élabore mécaniquement des suites finies de symboles, des 0 et des 1 qui codent la *forme* de formules logiques.

Une fois que cette étape a été franchie et que les paradigmes pour la connaissance du logicisme et du formalisme nous ont donné, entre autres, ces machines où le "raisonnement", en tant que déduction linguistique et formelle, est très bien réifié, on peut reprendre les idées de Poincaré sur les fondements des mathématiques (ainsi que de Riemann, Helmholtz et Mach, au moins pour ce qui en est de la géométrie, voir [Boi, 1995]) et laisser aux ordinateurs la tâche des déductions formelles (malheureusement, en pratique, même pour cela il faut toujours les accompagner, par des systèmes interactifs de preuve). Bref, on peut reprendre ce dialogue, pour analyser les fondements de la connaissance *et* des mathématiques avec ces biologistes, ces physiologistes, comme A.B., qui sont en train de comprendre ce qu'est notre présence, avec le corps, dans le monde, ce qu'est cette unité de notre être vivant et pensant. Car chez le vivant on ne retrouve pas la séparation entre "logiciel" et "matériel", cette idée révolutionnaire des Machines de Turing et des ordinateurs digitaux, mais qui n'a rien à voir, en particulier, avec la réalité biologique de notre cerveau dans son habitat préféré : le corps des hommes vivants dans le monde. Voici les motivations de ce compte-rendu et des réflexions que le livre de A.B. inspire.

2 - LA VISION ET L'ACTION.

Revenons donc au livre de A.B. La thèse centrale de ce livre est que la perception est essentiellement multisensorielle : le cerveau *sélectionne* et *intègre* une pluralité de sensations. La sélection et l'intégration sont largement conditionnées par l'action.

La vision, par exemple, est présentée comme une sorte de "prélèvement visuel" qui n'échappe pas à la sélection motivée par l'action. Elle est un des phénomènes physiologiques et cognitifs les plus complexes et son analyse parcourt presque tout le livre, en particulier les chapitres 2, 3, 9 et 10. En fait, l'interprétation du stimulus visuel utilise grandement le système sensori-moteur et elle se situe à plusieurs niveaux, corticaux et sous-corticaux (le cortex cérébral est la partie extérieure et plus récente du cerveau ; les activités conscientes ont lieu dans le cortex ; le reste y est "en dessous"). Résumons-en quelques aspects. La stabilisation du regard est réglée, grâce à six muscles oculaires et trente de la tête, par le système vestibulaire (partie de l'oreille interne qui assure les fonctions d'équilibration) : les mouvements du crâne et du corps sont compensés pour nous donner des images stables sur la rétine. Les saccades réflexes et volontaires nous font explorer le monde, comme si on "touchait" les objets de plusieurs points de vues («La vision est palpation par le regard», Merleau-Ponty, cité par A.B., p. 147). Cette exploration intègre à tel point l'action musculaire et le signal visuel que, pour supprimer l'effet de glissement de l'image sur la rétine, le signal qui part de celle-ci au cours d'une saccade, gérée par les muscles oculaires, est inhibé. Cette double interaction entre vision et action est matérialisée par des boucles neuronales qui renvoient (ou envoient ailleurs) les signaux d'origine visuelle : elles règlent, modifient, inhibent les actions et les signaux qui arrivent. Enfin, la vision sous-corticale joue un rôle très important (et souvent ignoré dans le diagnostic médical des déficits visuels), en particulier dans la détection du mouvement. Il peut en fait arriver que, malgré la destruction du cortex cérébral visuel, la perception du mouvement subsiste : une expérience surprenante d'enfants malvoyants qui jouent au basket est ainsi racontée [A.B., p. 59]. Ces enfants, qui n'ont pas de vision consciente, gardent des capacités innées, archaïques, de détection et de prévision du mouvement, que nous partageons avec maints animaux, capacités tout à fait remarquables : elles sont essentielles à la capture d'une proie, elles peuvent très bien servir à attraper une balle. On les utilise quotidiennement, dans un jeu complexe mais immédiat de suivi, d'analyse et de prédiction du mouvement, qui ne serait pas représenté

explicitement, dans un système interne d'axes cartésiens, et développé par des *calculs digitaux* pour la reconstruction des trajectoires, mais plutôt, simulé de façon *analogique*. Or, c'est bien l'Informatique, dès sa naissance, qui a mis en évidence ces différentes façons de représenter le monde : on peut le coder par un système de symboles (des suites fines de 0 et 1, par exemple) ou le représenter, coder si l'on veut, par un "phénomène analogue" (un courant électrique qui simule analogiquement un flux d'eau).

On apprécie, par exemple, la vitesse et l'accélération de la balle qui arrive par l'appréciation de l'élargissement de son image sur la rétine, sans nécessairement reconstruire une trajectoire, au niveau cortical ; on précède le parcours d'une proie, par une saccade, et la saccade elle-même fournit une simulation analogique du parcours à suivre pour capturer la proie : *elle "trace" la trajectoire de poursuite*. L'élargissement de l'image de la balle qui approche et la saccade oculaire qui précède et prépare un mouvement, une poursuite, sont "analogues" au phénomène représenté, ils ne sont pas et ne paraissent pas demander une représentation explicite du phénomène (c'est-à-dire, un codage "symbolique" dans un référentiel cartésien absolu), pour qu'il y ait action. Je pense que, à ce niveau, l'action intelligente est justement dans ce jeu de "codages" ou, plus précisément, dans le passage d'une représentation analogique à l'autre. L'élargissement de l'image de la balle ou de la pierre sur la rétine est une représentation analogique de la vitesse de l'objet et ses variations en codent l'accélération : le bras qui se lève pour rattraper ou pour nous protéger est la transposition de cette représentation sur un autre système de référence spatial, celui des muscles et des articulations. C'est-à-dire, on "simule", de façon réflexe, surtout suite à l'apprentissage, l'élargissement sur la rétine *par un geste*, en tant que représentation analogique (et "duale" dans ce cas) de cet élargissement dans un autre référentiel, celui du bras ; voici une forme d'intelligence primaire, mais fondamentale, de notre interaction au monde. On reviendra sur ce thème spécifique en parlant des seuils musculaires et du codage de l'espace qui leur est relié.

La poursuite d'une proie, voilà un autre défi clé pour la survie. Elle est toutefois préparée d'une façon bien différente, par la poursuite oculaire, chez les primates et chez d'autres mammifères. Le chat ou le lapin peuvent seulement faire des "sauts" d'un point à l'autre de l'espace visuel [A.B., p. 70] et les saccades paraissent donc fournir des points successifs dans l'espace pour la prédiction du mouvement : c'est notre fovéa de primate (la partie centrale de la rétine), apte à une analyse plus

fine, peut-être de nos activités manuelles, qui oblige l'oeil à un suivi continu, pour garder l'image dans un focus plus précis.

L'interaction des systèmes visuels et vestibulaires se présente dans maintes autres tâches. On reconnaît plus rapidement, par exemple, une image symétrique si son axe de symétrie est vertical ou horizontal : par contre, en microgravité (les astronautes), quand le système vestibulaire ne sait plus nous donner la verticale, on perd cette facilité dans l'identification des symétries [p. 82].

3 - SYMETRIES ET ESPACES EUCLIDIENS.

Au sujet des symétries, il y aurait une réflexion à faire, qui nous ramène à Poincaré. Pour Poincaré, le choix de la géométrie euclidienne est le plus "pratique" dans nos descriptions du monde (quoique Poincaré lui-même ait proposé, comme Einstein, de représenter le monde physique dans un cadre non-euclidien, il est conscient que les représentations euclidiennes sont plus adaptées à notre action). Je voudrais maintenant ajouter une remarque qui peut donner une des motivations pour la préférence que nous accordons à Euclide, dans la pratique quotidienne.

Si vous prenez une droite sur le plan et un point en dehors de la droite, le tracé d'une et une seule droite "parallèle" à la droite donnée est, intuitivement, celui qui donne plus de symétries. Faites le dessin : en plaçant une et une seule parallèle par un point à une droite donnée, on peut construire un axe de symétrie parallèle et entre les deux droites et une infinité d'axes orthogonaux. Si on s'imagine avoir plusieurs droites parallèles par ce point (Lobacevskij) ou aucune (Riemann), on perd, *pour un regard naïf*, tous les axes de symétrie orthogonaux sauf un, ainsi que l'axe de symétrie parallèle. Ceci est vrai pour notre regard immédiat, pour le dessin sur la feuille, non pas du point de vue mathématique, où la situation est plus complexe : si on décrit les géométries par des groupes de transformations, elles diffèrent pour certains automorphismes (les homothéties sont des automorphismes de la géométrie euclidienne seulement, car seulement cette géométrie est invariante par élargissement et rétrécissement), mais elles possèdent des groupes isomorphes d'isométries (isomorphismes topologiques ou algébriques selon les cas). Or les isométries du plan sont engendrées par les réflexions, c'est-à-dire par les symétries par rapport à une droite [Iversen, 1989] ; donc, dans les trois géométries, les symétries ont une expressivité *algébrique* comparable, et elles ne permettent pas de distinguer, mathématiquement, les trois systèmes de géométrie.

Voilà donc une cause possible de cette préférence *pratique* que nous accordons au cadre euclidien, tandis que *l'analyse possible* des symétries, en géométrie algébrique, des différentes géométries justifie leur "indifférence théorique" pour la physique, qui peut donc choisir le système empiriquement le plus plausible. Ce sont les symétries sur lesquelles tombe notre regard, celles de notre corps, de notre action, de notre mouvement, ces symétries qui sont dans le monde et que nous cherchons et projetons dans le monde, qui suggèrent le choix d'une *géométrie de l'action immédiate*, du geste, sans qu'il y ait une *priorité mathématique* dans cette préférence.

4 - REPRESENTATIONS ET CODAGE.

Toutefois le choix et l'usage de représentations mathématiques, fortement basées sur les symétries, comme sur d'autres formes de régularité, ne doivent pas nous faire croire que ces représentations sont explicitement reconstruites dans le cerveau : c'est un parcours évolutif et historique très long qui nous a amené à "voir" les objets comme représentés dans un espace cartésien. En fait, pour A.B. il n'y a pas de reconstruction centralisée de l'espace extérieur, mais une intégration multisensorielle de différents référentiels [p. 90], qui permet de simuler, par une "unité analogique", dans le sens que je disais ci-dessus, l'espace de la perception.

La composante essentielle de cette intégration est la proprioception musculaire : des seuils variables nous informent à tout instant de la position et tension des muscles. Ces seuils permettent de simuler directement l'espace de notre mouvement : ils constituent un référentiel implicite, aussi efficace qu'un système de coordonnées ; ils nous donnent, pour une certaine valeur fixée selon les circonstances, le point d'origine du système de référence [A.B., p. 123]. Alors, l'espace n'a pas besoin d'être représenté de façon explicite, dans un système de coordonnées cartésiennes ou par un codage pixel par pixel des points de l'espace : le seuil musculaire relatif à un certain angle du bras, par exemple, est lui-même le référentiel ou le codage d'une distance. C'est ainsi que, quand on fait un mouvement pour saisir un objet, le référentiel est constitué par l'espace articulaire, donné par les seuils musculaires, y compris ceux des muscles oculaires. Bref, dans cette hypothèse, que je développe à partir des remarques de Berthoz, le référentiel spatial est analogiquement reconstruit dans la proprioception des seuils musculaires, dans la mémoire vestibulaire des accélérations subies, dans l'évaluation analogique, par l'image sur la

rétine, des mouvements des corps autour de nous. Le passage d'une représentation analogique à l'autre, l'intégration, par comparaison et constitution d'invariants (l'aperception de la stabilité de certains phénomènes), est le premier élément constitutif de cette intelligence qui nous permet l'action dans le monde et qui, en fait, a sa *genèse* dans notre action dans le monde, dans la pluralité de nos représentations du monde et de notre action. Je pense donc que cette toute première forme d'intelligence, le bras qui se lève et saisit la balle qui s'approche, réside tout d'abord dans *le transfert* de la représentation analogique de la balle, de sa vitesse et de son accélération sur la rétine vers une autre représentation analogique, celle des seuils musculaires, qui simulent la direction, la vitesse, l'accélération de la balle dans leur propre système de référence, celui des articulations du bras. L'intelligence est loin d'être indépendante des codages, tout au contraire elle se construit tout d'abord comme *réseaux de codages* ou de représentations analogiques ; elle est acquise par une pratique de l'action dans le monde, sur un corps et une protocarte cérébrale qui rendent ce réseau possible. La pratique de l'invariance des objets du monde par rapport à la pluralité de nos référentiels et de nos codages nous permet de construire ou concevoir, nous donne accès après coup à cette "invariance" ou stabilité qui sera le propre de nos représentations conscientes du monde, de celles du langage et de l'espace par exemple, mais aussi des constructions conceptuelles les plus stables, les plus invariantes, celles des mathématiques.

La capacité de changer de référentiel est aussi analysée dans d'autres expériences, comme celle de la "rôtissoire" : le sujet est couché à l'horizontale et tourne à vitesse constante suivant un axe de rotation perpendiculaire à la gravitation terrestre (et qui le traverse de la tête aux pieds). «Si on lui presse les pieds, le sujet a soudain l'impression de basculer, que son corps est maintenant vertical et qu'il tourne sur lui-même en position debout. Si on lui presse sur les fesses, il a l'impression d'être assis et de tourner sur une chaise... Dans ces cas, les informations tactiles déterminent le référentiel dans lequel s'effectue la rotation» [A.B., p. 117].

Donc notre *sens* de l'espace, et, j'ajoute, l'émergence d'un *concept* mathématique d'espace, est loin d'être une affaire du cerveau à lui seul, mais il est dans le rapport entre cerveau et corps : le corps aussi, du système vestibulaire aux muscles des yeux ou des bras, à la peau, participe à la représentation de l'espace et du mouvement et contribue à en constituer la mémoire, avec ses référentiels spécifiques. Bref, nous

n'aurions pas dans la tête une représentation à trois dimensions de l'espace dans laquelle insérer les représentations objets, ni un codage de celui-ci par des suites alphanumériques, pixel par pixel, comme sur un écran de télévision ou dans la mémoire d'un ordinateur digital, mais l'espace serait inscrit dans la mémoire de notre action, en tant qu'évalué par les tensions musculaires, nos saccades oculaires, les accélérations subies par systèmes vestibulaires, etc....

Je voudrais essayer de comprendre comment ces différentes conceptions de nos représentations de l'espace peuvent avoir un rapport avec des approches des fondements des mathématiques qui ont marqué notre siècle. On exclut pour le moment l'idée que l'on ait une représentation tridimensionnelle explicite du monde dans la tête, une sorte de maquette cartésienne à trois dimensions composée de neurones, car elle semble présupposer un homoncule qui la regarde. Essayons plutôt de comparer l'idée que A.B. me paraît nous proposer à cette idée d'un espace absolu, une structure unique où tout insérer et à celle du codage "symbolique", par des 0 et 1 par exemple, qui représenterait toute forme d'intelligence dans nos neurones, y compris celle de l'espace physique, pixel par pixel, et l'élaborerait en tant qu'information alphanumérique.

Je voudrais alors rappeler l'un des grands résultats *négatifs* de la Théorie des Ensembles, dû à l'inventeur même de cette théorie, Georg Cantor. Ce résultat concerne les tentatives de proposer la Théorie des Ensembles comme fondement ultime des mathématiques, tentatives où l'on impose — notamment depuis l'axiomatique hilbertienne de la Géométrie — une correspondance parfaite entre le continu des nombres réels et celui de l'espace.

Cantor démontra, vers 1877, qu'on peut établir une correspondance bijective entre la droite réelle et le plan cartésien. Il en fut bouleversé : ai-je détruit, se demanda-t-il, la notion cartésienne de coordonnée, en permettant de coder par une seule dimension le plan bidimensionnel ? Dans une lettre, Dedekind lui expliqua son erreur, dans l'interprétation de ce théorème remarquable : vous introduisez dans la correspondance, lui écrit-il, une «discontinuité à donner le vertige». En fait, toute correspondance bijective entre la droite et le plan fait perdre la structure métrique et topologique du plan : deux points proches de la droite (ou du plan) sont transformés, par cette correspondance, dans des points arbitrairement éloignés du plan (ou de la droite). Bref, elle n'est pas un isomorphisme d'espaces métriques ou topologiques, mais seulement une correspondance point par point, tout ce que la catégorie

des ensembles peut nous donner. Pour cette raison, elle fait perdre le sens même de l'espace cartésien : la notion de distance, de vecteur, en fait, de voisinage. Le théorème de Cantor est donc un résultat négatif : il nous dit que la Théorie des Ensembles est un cadre fondationnel insuffisant pour les mathématiques, car elle est tout d'abord une théorie des ensembles de points ou "tout se fonde" sur les points. En mathématiques, il y a *en premier lieu* des structures (algébriques, métriques, topologiques etc.), tandis qu'en Théorie des Ensembles celles-ci sont "superposées", chaque fois ad hoc, par rapport au coeur de la Théorie elle-même, les points sans dimension ni structure, dans son univers absolu de référence, la collection de tous les ensembles. Heureusement, grâce à la Théorie des Catégories, on a, depuis 50 ans, un excellent complément aux carences de la Théorie des Ensembles : dans cette théorie, on développe les mathématiques selon la structure analysée ; elle ne se base pas sur un seul grand univers de référence, *a priori* et "sans structure" ; dans une catégorie, la notion de "point" est possible, comme notion dérivée, comme en Géométrie où on peut la dériver en tant qu'intersection de deux lignes (voir [Longo, 1998]). En Théorie des Catégories on n'aurait même pas conjecturé le théorème de Cantor, car le plan et la droite y apparaissent dans les "bonnes catégories", avec leur structure spatiale, leur notion de distance, leur "norme", comme le monde de nos mouvements : dans ces catégories, le plan et la droite réels sont loin d'être isomorphes.

Or, l'approche proposée par A.B. me paraît se relier à une vision structurée (catégorique) de la représentation de l'espace pour deux raisons : l'espace dont il nous parle est toujours structuré par le geste, le mouvement, et il n'est jamais absolu, mais relatif à la structure qui intéresse. En fait, *l'analogie reconstruit l'essentiel (la structure spatiale intéressante) du phénomène simulé*, pour l'action. Le référentiel modulaire des seuils, des saccades, du système vestibulaire, du tact, est choisi et modifié selon la structure de l'espace ; il est fonctionnel à l'action du moment : la saccade qui simule la course de la proie ou précède la poursuite, le mouvement du bras qui simule le déplacement de l'objet à saisir, préservent exactement la structure qui intéresse de l'espace.

Un autre grand résultat négatif en mathématiques se base aussi sur une technique de codage : les théorèmes d'incomplétude de Gödel, dont le coeur est le "lemme de représentation", disent que, dès qu'une théorie peut coder sa propre métathéorie, alors cette dernière n'est pas assez expressive, dans le sens qu'elle n'arrive pas à démontrer la cohérence de

la théorie en question. Bref, ils montrent l'insuffisance des métathéories codables.

Or, il me semble que ces résultats surprenants, mais négatifs, de Cantor et Gödel, qui soulignent les problèmes que posent les codages, ont plutôt fourni un paradigme, plus au moins implicite, pour les maintes tentatives de coder toute forme de perception et d'intelligence humaine, y compris notre intelligence spatiale, de "façon linéaire", comme en transférant toute l'information sur une droite ou par des suites finies de symboles sans signification, point par point, pixel par pixel, de manière absolue, indépendamment de la "structure" de l'intelligence en question (par exemple de son rapport à l'espace par des référentiels spécifiques). Autrement dit, on a pris ce genre de résultats comme point de départ de théories "fonctionnalistes" qui travaillent "à codage symbolique près" (ou supposent l'indifférence du codage) et partent de l'hypothèse que : «Intelligence ... is effectively defined as that which can be manifested by the communication of discrete symbols» ([Hodges dans Herken, 1992]). Et, malgré les maints succès dans la conception de systèmes experts et de systèmes interactifs de preuve, centrés sur les langages et la déduction formels, donc sur l'élaboration de suites discrètes de symboles, les robots qui représentent aussi l'espace dans un référentiel cartésien absolu et/ou le codent pixel par pixel, en développant ensuite des calculs symboliques monstrueux pour faire un pas, continuent à trouver des difficultés immenses dans leur moindre action, tout en étant censés, par ces méthodes, simuler l'homme ou l'animal dans son mouvement intelligent. Par contre, le physiologiste nous dit deux choses fondamentales : d'abord, le rôle essentiel des référentiels structurés, qui dépendent des contextes et de l'action ; deuxièmement, qu'il y a une intelligence sous-corticale du mouvement, qui ne possède pas de représentation explicite, encore moins symbolique.

D'autre part, si on interprète différemment ces grands "théorèmes de codage", les mathématiques peuvent nous enseigner que le codage n'est pas toujours "transparent", tout comme il n'y a pas d'isomorphisme (codage) entre droite et plan qui préserve la structure qui importe (Cantor et Dedekind) et que toute intelligence métathéorique codable est très peu expressive (Gödel). Pour résumer, dans mon interprétation, les bijections avec lesquelles on prétendrait coder toute forme d'intelligence par des suites discrètes de symboles, sur n'importe quelle machine, font perdre l'essentiel de l'intelligence, tout comme la droite ne peut pas contenir toute l'information du plan ; de façon similaire, en

Logique, Gödel nous dit que les codages arithmétiques ne saisissent pas les métathéories (infinitaires, mais tout à fait "intelligentes" et humaines) qui prouvent la cohérence.

En général, ces codages font perdre le *sens*, qui dépend du contexte, de notre corps, de nos espaces d'êtres vivants et d'humanité, y compris la structure de l'espace physique et le but de l'action. En particulier, la distance dans l'espace, ce vecteur qui est mon bras tendu, qui est mon mouvement, la notion de voisinage sont perdus dans le codage linéaire, comme l'avait déjà expliqué Dedekind à Cantor : le geste dans l'espace pluridimensionnel, le *sens du mouvement* (pour Poincaré, localiser un point dans l'espace, c'est s'imaginer le mouvement qu'il faut faire pour s'y rendre) font directement partie de nos formes de reconstruction du monde et d'intelligence, dans la spécificité de notre structure physiologique et ne passent pas par une représentation absolue et explicite, encore moins par un codage symbolique. J'oserais même dire que la toute première forme d'intelligence est dans le passage d'un codage (ou, mieux, représentation analogique) à l'autre, comme dans l'opération de capture d'une balle qui arrive, ainsi que dans l'intégration des différents codages : l'intelligence *est* ou se *forme* dans ce réseau interconnecté de représentations neuronales spécifiques et dans la constitution successive d'invariants conceptuels, à partir de l'intégration multisensorielle. Et la constitution de ces invariants est au cœur, comme j'essaierais de dire, de nos constructions mathématiques, en fait de leur *fondement*, en tant qu'analyse d'une genèse.

5 - INTEGRATION MULTISENSORIELLE

«Une propriété fondamentale de l'intégration multisensorielle dans le colliculus [partie du mésencéphale] est la suivante : c'est le champ récepteur qui est la référence pertinente pour l'intégration multisensorielle et non pas l'espace extérieur. La fusion des capteurs se fait dans l'espace des champs récepteurs et non pas en reconstruisant centralement l'espace cartésien extérieur» [A.B., p. 90]. Remarque difficile à interpréter : en partie, elle reprend les observations ci-dessus sur la simulation et la prévision spatiale comme précédant toute représentation explicite. On y retrouve aussi le problème de l'intégration multisensorielle : est-ce la pluralité des formes de proprioception et de perception qui donne une "synthèse" (une moyenne ou somme vectorielle) de la situation du monde ou y a-t-il un «schéma corporel... interne qui est modulé ou modifié suivant la configuration des capteurs» ? Car il n'y a pas «un seul référentiel égocentré, mais de

multiples représentations du corps», d'où le problème de l'intégration dans un seul schéma corporel de plusieurs sous-systèmes neuronaux locaux [A.B., p. 123]. La pluralité des référentiels extérieurs paraît permettre au cerveau une sélection de la tâche à accomplir, en modulant ce schéma, en accord avec les remarques de la section précédente.

Le mécanisme d'intégration de ces simulations de l'ego et du monde est aussi rendu possible par un phénomène remarquable : les "fenêtres temporelles". Le réseau neuronal du culliculus élabore une mémoire qui maintient la sensibilité des neurones multimodaux pendant un certain temps : on superpose alors le chant et la vision d'un oiseau qui chante loin, malgré la différence de vitesse de propagation du son et de la lumière [A.B., p. 91]. Des phénomènes similaires peuvent avoir lieu pour la proprioception : un choc simultané sur différentes parties du corps est perçu en tant que tel grâce à un jeu similaire des fenêtres temporelles.

Cette intégration des stimuli dans un référentiel unique, dont la gestion de ces retards est un exemple, est en fait aussi construite dans l'ontogenèse et non pas seulement héritée par la phylogenèse, car le corps se prolonge aussi dans nos outils : on sent la texture du papier au bout du crayon et non pas sur la main qui tient le crayon ; le pilote expert sent les roues de l'avion toucher le sol, comme s'il s'agissait de ses propres pieds [A.B., p. 108]. On construit, par la pratique, souvent difficile et longue, des nouveaux référentiels spatiaux et on les intègre. Et, même dans ces cas acquis, on choisit les entrées sensorielles en fonction du contexte [A.B., p. 242].

Un autre aspect surprenant de l'intégration multisensorielle est le suivant. Certains neurones du putamen (une partie du "striatum" cérébral) s'activent aussi bien par la stimulation tactile d'une partie du corps que quand le sujet voit un objet *s'approcher* de la même partie du corps [expériences sur le visage des singes, A.B., p. 95] : l'activation de ces neurones ou groupe intégré de neurones est une façon concrète et profonde d'assurer la prévision, par une intégration multimodale.

Prévision et anticipation : voilà deux éléments essentiels de la (sur)vie d'un être vivant dans le monde, soulignés à maintes reprises par A.B. La prévision est essentiellement passive, l'anticipation est active et contribue à constituer le futur. Et le présent, car le présent est une "rétention" (modulation du passé et du présent) et une "protention" (constituant du futur et qui constitue aussi le présent). En fait, pour le physiologiste, *la perception est fonction non pas tant de l'intensité*

d'une stimulation que de la concordance de celle-ci avec une hypothèse faite par le cerveau [p. 61, p. 102]. De plus, on mémorise cette perception, qui dépend donc d'une prévision, pour prévoir et agir. Mémoire de trajets qui est dégradée en cas de lésions vestibulaires [p. 130]. Mémoire "vestibulaire", car le cerveau garde une mémoire directe du mouvement perçu par le système vestibulaire [p. 131], de sa vitesse et de son accélération ; bibliothèques de trajectoires, de formes, de visages. Une expérience met en évidence la mémoire des saccades oculaires et vestibulaires : après une rotation dans le noir, on retrouve une cible en parcourant à l'envers, par une saccade oculaire, l'angle enregistré par les canaux semi-circulaires [p. 131]. En fait, on prédit où se trouvera la cible. Encore une fois Poincaré avait eu une belle intuition à ce sujet, en soupçonnant le rôle du jeu entre mémoire et prédiction, en particulier pour le mouvement : «Connaissant l'accélération du mouvement de rotation de la tête à chaque instant, nous en déduisons, par une intégration inconsciente, l'orientation finale de la tête par rapport à une certaine orientation initiale prise comme origine» [cité p. 135].

6 - MEMOIRE ET MATHEMATIQUES.

Mémoire du mouvement, de la vitesse et de l'accélération ; bibliothèques de trajectoires. Une question que je me pose est la suivante. Est-ce que cette mémoire des courbes possibles ou optimales est à la base de "l'interpolation" de points ou d'un trait incomplet par une ligne ? L'école gestaltiste nous a donné maints exemples surprenants de ces ensembles de points, éparpillés plus ou moins régulièrement dans l'espace, de lignes incomplètes, qui nous rappellent un triangle, un carré ou un contour qui courbe en douceur et que nous interpolons ou complétons, selon leur structure dans l'espace, par des droites ou des "splines", lignes mathématiquement optimales, comme est aussi optimale la "courbe mathématique de poursuite" de l'animal qui chasse. Indices spatiaux, ces points, et de mémoire, ces trajectoires, que nous rassemblons dans une construction, indépendante du souvenir spécifique et qui nous fait "voir" ces images parfaites de la géométrie élémentaire. Le segment que nous "voyons" entre deux points, les lignes avec lesquelles nous interpolons des ensembles de points ou des lignes incomplètes, sont des courbes optimales ou continuent les lignes selon leur courbure. *Le triangle, le carré, le cercle mathématiques* ne sont peut-être pas des "généralisations" (que veut dire ce mot dont on abuse ?) de la vision immédiate des pierres rondes ou carrées, comme nous

proposaient les empiristes, mais *ils sont des reconstructions, à l'aide de la mémoire, d'une pluralité d'actes d'expérience spatiale : les lignes interpolant des points sont les traces mnésiques de trajectoires "parfaites", en tant qu'optimales, dans l'espace de nos mouvements*. C'est l'expérience de trajectoire, vécue ou imaginée, dans l'action de poursuite, par exemple, que nous projetons sur l'image incomplète.

La *cohérence* et l'*objectivité* de la construction conceptuelle que, ensuite, nous proposons, la géométrie dans ce cas, se fondent sur l'efficacité de notre action dans le monde (car le monde, ses symétries, sa connexion, ses régularités s'imposent à nous ou "font résistance", quand nous agissons, ainsi que quand nous proposons une théorie) et sur l'*intersubjectivité*, en tant que comparaison avec la construction d'autrui, ou en tant que "acte de construire ensemble" par le langage, le dessin, au cours de l'histoire. Mais la géométrie n'est pas seulement une *émergence* de la praxis, de notre rapport actif et collectif au monde, elle trouve aussi son *fondement* dans celle-ci, car on ne peut pas départager l'analyse fondationnelle de l'analyse épistémologique. Dans ce sens, le fondement de la géométrie (des mathématiques, en fait) n'est pas logique, n'est pas dans une poignée d'axiomes et de règles syntactiques : ces axiomes, ces règles, fournissent un choix possible de *principes de preuve*, souvent incomplets, conventions commodes pour classer les différentes constructions possibles. Ils constituent, *a posteriori*, un squelette formel de structures qui sont énormément plus riches, dont l'origine *et* le fondement sont ailleurs : dans la praxis, enrichie par le langage. Ce langage, outil de l'intersubjectivité, qui permet de *proposer*, et de comparer des constructions explicites et qui nous permet d'arriver, ensuite, jusqu'à la description algébrique, et, enfin, aux systèmes axiomatiques, description la plus générale des structures mathématiques que nous sachions donner, *aboutissement* d'une pratique et non pas son fondement. En bref, le fondement des mathématiques n'est pas dans l'échafaudage logico-formel, donné dans un langage symbolique, ni dans les preuves de cohérence logique : cet échafaudage est *a posteriori*, il s'ajoute à la construction mathématique, en particulier à la construction géométrique, et ne la fonde pas. Sa cohérence, comme souligne [Weyl, 1927], est une condition *nécessaire*, elle n'est pas *suffisante* pour la justification ni pour l'analyse de l'objectivité et de la généralité des mathématiques.

L'autre aspect de la mémoire qui me paraît contribuer à la construction mathématique est la pratique de *l'invariance*, en tant

qu'indépendance par rapport aux représentations spécifiques, aux codages, aux "détails" d'un type ou d'un autre, selon les buts de l'action. La mémoire humaine, en fait, paraît garder des indices aussi bien que des "invariants", ou, plutôt, elle contribue à constituer des invariants.

Le souvenir des actions essentielles pour agir dans une situation particulière, une forêt ou une gare de train par exemple, nous permet de nous débrouiller assez bien aussi dans une autre forêt ou dans un aéroport : on se souviendra donc des points de repères et des actions communes, de ces invariants spatiaux et comportementaux qui nous font reconnaître une certaine stabilité dans le monde. C'est peut-être pour réduire l'encombrement que la mémoire sélectionne des "éléments essentiels" à l'action, selon des critères très variés. On "distille" ainsi des invariants. Voilà une pratique profonde que l'on retrouve à tout instant dans la conceptualisation mathématique. En fait, l'invariance conceptuelle est au cœur des mathématiques : les nombres (entiers) acquièrent dans l'histoire un statut mathématique quand l'expérience d'une pluralité de notations possibles permet de mettre à feu le *concept* de nombre, comme l'invariant sous-jacent les différentes notations. Les mathématiques naissent aussi quand le géomètre grec va au-delà des maints exemples de triangles connus par les égyptiens avec la "relation de Pythagore" entre les côtés, il démontre le *théorème* de Pythagore sur un triangle spécifique (on ne peut pas se passer, pour cette preuve élémentaire, d'un croquis sur le tableau ou sur le sable) et ajoute : la preuve que j'ai donnée sur ce dessin ne dépend pas du dessin spécifique, ce triangle-ci avec *ces longueurs-ci* des cotés, mais elle dépend seulement de l'hypothèse que cet angle est droit (et il démontre cette observation en parcourant la preuve, où il n'utilise pas d'autres hypothèses). Le théorème est donc valable pour *tout* triangle rectangle. Il a construit alors un invariant, le plus important de tous les invariants mathématiques : la généralité de la preuve par rapport au dessin, au système de référence spécifique. Sommes-nous aidés, dans cette formidable construction conceptuelle, par la pratique consciente et inconsciente des invariants sur lesquels se bâtit notre mémoire ? *Si oui, le fondement de cette invariance, qui est au cœur de la preuve mathématique, n'est pas logique, mais pratique.* L'analyse logique de la preuve l'encadre a posteriori, elle le clarifie, mais *ne suffit pas* à le fonder, comme observait déjà Weyl. L'analyse conceptuelle de Frege, par exemple, réduit l'Arithmétique (et l'Analyse Mathématique, en raison de la construction des réels de Cantor et Dedekind) à trois axiomes pour le 0 et le successeur plus la règle d'induction

arithmétique ; ensuite, elle reconduit cette dernière à un principe logique général du raisonnement humain (par une sorte d'atomisme logique), et pose donc les bases de la logique mathématique moderne. Frege est conscient d'être en train de proposer un départage net entre analyse fondationnelle et épistémologie et se débarrasse de l'épistémologie par une critique sévère (et justifiée) du psychologisme et de l'empirisme de l'époque (Stuart-Mill).

Toutefois, à partir de ce travail remarquable, la logique mathématique est devenue, après les années trente, une *branche* des mathématiques : comme l'avait prévu Wittgenstein, les métamathématiques hilbertiennes, en particulier, en tant que "jeu de règles" mathématiques, font *partie* des mathématiques et ne peuvent pas les "fonder". Ce qui confirme la thèse que le problème des fondements des mathématiques est un problème épistémologique, il ne peut pas être seulement (logico-)mathématique. En fait, la démarche de Frege ne fait que transférer le problème épistémologique des mathématiques vers celui d'une "logique" ou "langue formulaire de la pensée pure", où, selon moi, il continue à se poser. Car le choix même de fonder les mathématiques, la géométrie en particulier (ce qui sera fait par Hilbert, non pas par Frege), sur des langages logiques ou formels contient déjà un fort engagement épistémologique et pose le problème d'une épistémologie de la Logique (ou des méthodes finitaires hilbertiennes). Par ce biais même, toutefois, la Théorie de la Preuve de Frege et Hilbert nous permet aujourd'hui d'aller plus loin, d'approfondir notre analyse de la démonstration en mathématiques ainsi que de son épistémologie ; car le problème qui se pose aujourd'hui est, certainement, celui de l'approfondissement de l'analyse (logique) du langage des mathématiques, de ses acquis remarquables, et de son extension à une analyse directe du rapport entre géométrie mathématique et espace sensible, en reprenant les intuitions de Riemann, Poincaré, Weyl et Enriques, entre autres.

A.B. propose un autre élément qui peut aider à justifier l'hypothèse que je viens de faire sur le rôle des invariants, dans le cas de la géométrie : «la mémoire de l'espace est ... mémoire du mouvement dans l'espace : elle est donc essentiellement multisensorielle» [p. 132]. L'espace de nos représentations explicites et conscientes, en fait mathématiques, serait alors l'invariant, ce que *nous proposons* de commun, par rapport à la pluralité des représentations implicites, des mémoires multisensorielles, un invariant distillé aussi par la mémoire. Il doit être clair, toutefois, que ces *propositions*, que nous faisons, ne

sont pas arbitraires, car elles s'appuient sur des régularités qui sont dans le monde (les symétries, des géodésiques ...) et sur l'interface qui se constitue par notre action dans le monde, dans et grâce à la multisensorialité.

7 - MOUVEMENT ET ESPACES ALLOCENTRIQUES.

On vient de citer maints exemples où le cerveau mémorise les mouvements (direction, vitesse et accélération) aussi bien que l'espace. En fait, la reproduction d'une distance serait faite par comparaison entre simulation interne d'un mouvement mémorisé et l'information des sens. «Le cerveau est un comparateur qui mesure les écarts entre ses propres prédictions fondées sur le passé et les informations qu'il prélève sur le monde en fonction de son but» [A.B., p. 134].

Mais il y a plus que ça (il devrait être désormais clair au lecteur que le cerveau n'agit jamais à un seul "niveau", tout y est ... "multi"). Au cours de l'enfance, nous passons d'un regard vers le monde et d'une insertion dans l'espace ambiant, purement *égocentriques*, à la construction de divers référentiels *allocentriques* (spatiaux, mais aussi émotionnels, de l'intentionnalité ...). Pour en rester à l'espace, les expériences chez le rat démontrent que, quand cet animal se familiarise avec des parcours ou des espaces, certains neurones de l'hippocampe déchargent chaque fois que l'animal passe par un endroit particulier [A.B., p. 138] ; probablement, cette activité neuronale est à la base des excellentes performances du rat dans les labyrinthes. Ces cellules de lieu coderaient donc analogiquement l'espace sensible. Une représentation allocentrique ? On trouve là une légère contradiction dans le livre, clarifié par une discussion avec l'auteur. En effet [A.B., p. 110], on dit que seuls les primates sont capables d'avoir une appréciation allocentrique de l'espace : on apprécie la distance entre deux arbres, entre la table et la porte, indépendamment de nous, de notre position dans l'espace ; on commence à en faire une géométrie objective. Or, le rat reste au niveau de la représentation égocentrique, malgré les performances de son hippocampe : ces neurones s'activent quand *le rat passe* par ces endroits. Une forme presque "objective" de représentation égocentrique de l'espace, donc, qui me paraît un passage de la représentation égocentrique à celle allocentrique : pour le rat, tout n'est pas centré sur lui, car il se voit là, dans l'endroit où il passe¹.

¹ Toutefois la nature et l'évolution ne sont pas linéaires : il serait intéressant de savoir si l'espace des abeilles, cet espace qu'elles décrivent aux autres abeilles par des danses très

Le passage des formes de représentation égocentrique du monde, à des représentations allocentriques, suggère justement un autre élément à l'origine de la construction géométrique : dans la représentation allocentrique, les choses et leurs distances sont là, elles ne dépendent pas de nous, elles sont invariantes par rapport à maints événements possibles. Ensuite, le langage nous permet de comparer nos expériences avec celles d'autrui ; un outil essentiel pour la généralisation des représentations spatiales, qui confirme l'objectivité, par l'échange intersubjectif, de la distance entre cette arbre-ci et celui-là. Bien plus en avant, dans l'histoire, on continuera à utiliser l'expressivité du langage, jusqu'à parler de l'espace avec l'algèbre, en toute généralité.

complexes, est égocentrique ou allocentrique (et si, dans ce cas, cette classification a encore un sens).

8 - TRAJECTOIRES ET ANTICIPATION.

Certaines régularités de la physique, de la chimie, de la vie, comme les symétries, les réflexions de la lumière, les trajectoires minimales que le monde nous impose, "forcent" des structures dans nos constructions conceptuelles, et rendent non-arbitraires les univers possibles des mathématiques : l'analyse épistémologique doit partir de cette "objectivité" du monde et se prolonger à la constitution phylogénétique, ontogénétique et, enfin, intersubjective.

L'analyse de Viviani [p. 159] des relations mathématiques entre courbure et vitesse des mouvements de la main en est un bel exemple : notre geste n'est pas arbitraire, il suit des régularités, il parcourt des lignes minimales d'équilibre. On retrouve ces lignes même dans le dessin, dans les formes "aux secousses minimales" [p. 165] (une secousse est la dérivée d'une accélération). Est-ce que notre corps suit la forme — se demande A.B. — ou, plutôt, la forme résulte du fonctionnement du corps ? Les deux phénomènes ont lieu, dirais-je : la forme se constitue grâce à la présence des objets dans le monde, y compris notre corps, et notre corps se façonne, prend forme dans l'évolution, par son agir dans le monde, avec ses géodésiques et ses symétries. La description mathématique de ces formes est, ensuite, notre pari de représentation ; elle n'est pas arbitraire, mais elle est loin d'être unique, comme les géométries non-euclidiennes nous enseignent. Ce qui lui donne son objectivité, ce sont ces régularités du monde qui s'imposent à notre présence et qui seront sous-jacentes à toute bonne (cohérente) représentation du monde, construite dans l'intersubjectivité.

Mais nous ne sommes pas passifs face à ces régularités. Les trajectoires, par exemple, qui sont au coeur de notre action, ne sont pas suivies passivement par notre corps : A.B. nous explique que nous anticipons le mouvement à faire [p. 164]. En particulier, dans la poursuite oculaire, on *précède* la cible et, par cela, nous préparons la trajectoire à suivre, s'il s'agit, par exemple, de capturer une proie. «Autrement dit, nous nous dirigeons vers l'endroit que nous regardons et non pas le contraire» [p. 201].

Ce mouvement est préparé, par anticipation, d'une façon très complexe. Si je regarde devant moi et qu'un objet bien visible se trouve à ma droite de 60°, hors de la portée de ma fovéa, quand je fais une saccade volontaire vers la droite, de 30° disons, l'activation des neurones du cortex pariétal, qui déchargeaient en correspondance de cet

objet, *se déplace* quelques millisecondes *avant* que la saccade ait lieu, pour se retrouver à l'avance en correspondance de ce déplacement du stimulus de 30° (!). Tout le cortex pariétal en fait réorganise son champ récepteur *en avance* sur les conséquences du mouvement [A.B., p. 224]. L'intégration sensori-motrice est donc extraordinaire et cette boucle entre stimuli, prévision, action, réaction du monde et du corps, est au centre du développement de notre cerveau. «Le cerveau n'est pas formé de simples systèmes qui transforment les signaux sensoriels en commandes motrices : il est constitué de boucles fermées. *L'action modifie la perception à la source*» [A.B., p. 221]. On peut en fait comprendre la formation du cerveau comme une sorte de "complexification de l'axe réflexe" : la structure différenciée du cerveau se forme, comme propose A. Prochiantz [1997], en réponse à «la nécessité de lier des réflexes d'ordre sensori-moteur à d'autres modalités sensorielles» au cours de l'évolution. Voilà ce réseau de représentations, façonnées par l'action, qui sous-tend toute forme d'intelligence et dont je parlais ci-dessus.

Bref, on questionne à tout instant le monde, en interrogeant les capteurs selon les besoins, les intentions ; on en règle la sensibilité, on anticipe les réponses, on les compare aux entrées combinées, sur la base d'une simulation-représentation interne, en général analogique, des conséquences attendues de l'action. Mon idée est que nos constructions conceptuelles (mathématiques en particulier) non seulement trouvent leur genèse dans ces phénomènes, mais aussi obéissent au même paradigme : suite à notre action dans le monde, nous faisons des paris de représentation explicite, qui ne sont pas arbitraires, car ils sont riches de mémoire (la mémoire dont on parlait plus haut, qui distille des invariants, mais aussi la mémoire commune, historique, voir [Longo, 1995]), et on construit sur ces mêmes paris, par des analogies, des métaphores, qui relient une structure mathématique et/ou une méthode de travail, à une autre. Le langage et la logique, cette dernière en tant que lieu de l'invariance conceptuelle explicitée, consciente, et de la stabilité méthodologique, entrent massivement dans ce jeu, mais ils n'en sont pas le fondement ultime, encore moins unique.

9 - GENESE ET FONDEMENT : DES TRAJECTOIRES AUX FORMES.

Dans l'analyse des fondements des mathématiques, l'erreur du formalisme a été de croire que l'on puisse *isoler* une structure mathématique (importante) des autres et la décrire *complètement* par quelques axiomes et principes de preuve, en tant que suites discrètes de

symboles. Tel est le sens des hypothèses de complétude et décidabilité des systèmes formels (importants, comme l'Arithmétique) : que nos constructions conceptuelles puissent être départagées les unes des autres et représentées complètement par un seul niveau, celui du "langage objet" ou formel, sans communication avec les autres niveaux et les autres structures. Non, on démontre des propriétés des nombres entiers en passant par les nombres complexes, on utilise le métalangage pour prouver des propriétés d'une structure, données dans un langage formel. Parfois, *a posteriori*, on arrive à reconstruire certains de ces résultats dans le cadre formel proposé, mais la Théorie de la Démonstration elle-même, cette formidable branche des mathématiques inventée par les logicistes et les formalistes, démontre que cela n'est pas toujours possible. Au cours des trente dernières années, des théorèmes sur les entiers ont été démontrés (des énoncés intéressants, non pas des astuces diagonales comme "je ne suis pas démontrable") où le métalangage, le langage et la sémantique se mêlent, d'une façon essentielle, *dans la preuve* (certains théorèmes de Normalisation, voir [Girard et al., 1989]) ; d'autres, où l'infini et sa signification sont tout aussi inévitables pour la démonstration (la forme finie de Friedman du Théorème de Kruskal ; voir [Longo, 1999 à paraître] pour une introduction, [Harrington et al., 1986] pour le résultat dans les détails). On ne peut pas coder les mathématiques à un seul niveau conceptuel (les formalismes linguistiques finitaires des suites discrètes de symboles) : les entiers font partie des nombres réels et puis des complexes ; leurs propriétés dépendent aussi, comme le disent ces théorèmes, du métalangage dans lequel nous définissons leur langage ainsi que de propriétés infinitaires, de la *signification* des mots avec lesquels on parle de l'infini, par exemple.

Les mathématiques se constituent par des constructions conceptuelles, comme la suite *infinie* des nombres entiers, les rationnels, les réels, les nombres complexes. Elles se constituent en établissant des ponts entre structures différentes, en les utilisant pour en bâtir des nouvelles, dans un réseau intégré de connaissance, exactement comme des propriétés de nombres complexes peuvent nous donner des propriétés de nombres entiers finis et l'infini peut être essentiel pour démontrer des théorèmes énoncés dans des systèmes finitaires.

A fortiori, on ne peut pas coder la variété de nos formes d'intelligence sur une seule dimension conceptuelle, par les suites discrètes de symboles des formalismes : notre intelligence est le

résultat d'une intégration de plusieurs modalités d'action et de présence dans le monde, structurées par la pluralité de nos rapports à l'espace, entre autres. Notre représentation explicite de l'espace, en particulier, est le résultat d'une intégration d'expériences multi-sensorielles, de la mémoire, de l'intentionnalité propre à la prédiction et à l'action.

Perdons-nous par cela tout espoir des donner des "fondements" à la connaissance, de "parler" même de la connaissance ? Devons-nous nous taire face à la complexité de la tâche, une fois que l'on a compris qu'il est impossible de coder le mode multidimensionnel de notre présence dans le monde pixel par pixel ou par une seule dimension ? Pas du tout. Considérons les mathématiques. Les pères fondateurs de la logique mathématique, au début du siècle, ont pu proposer cette discipline remarquable grâce au «dogme tout-puissant de la cassure principielle entre l'élucidation épistémologique et l'explicitation historique aussi bien que l'explicitation psychologique dans l'ordre des sciences de l'esprit, de la cassure entre l'origine épistémologique et l'origine génétique ; ce dogme, dans la mesure où on ne limite pas de façon inadmissible, comme c'est l'habitude, les concepts d'"histoire", d'"explicitation historique" et de "genèse", ce dogme est renversé de fond en comble» [Husserl, 1933 : p. 201]. Grâce à ce dogme, l'épistémologie des mathématiques est devenue "logique" (Frege, Russell) et, puis, "formelle et finitiste" (Hilbert), bien séparée de nos espaces humains de signification et d'action : elle a été restreinte à la seule dimension logico-formelle, qui n'utilise que le langage. Ensuite, grâce à ce développement pratique du formalisme et du logicisme qui s'appelle l'Informatique, (presque) tout ce qui est "codable formellement" a été réifié dans des machines qui ont changé notre vie. C'est alors justement le moment, aujourd'hui, pour ce qui en est des mathématiques faites par l'homme, de recomposer cette cassure, de renverser «ce dogme ... de fond en comble», comme proposait Husserl, et de mettre le doigt aux endroits difficiles où épistémologie et genèse se superposent ; pour l'instant, on a essayé ici d'esquisser le rôle possible des symétries et de la constitution des invariants, en tant que résultats d'expériences multisensorielles du monde et des activités de la mémoire. Peut-être, même des machines nouvelles pourront en dériver.

Voici l'une des nombreuses difficultés posées. La Théorie de la Démonstration moderne a mis en évidence et analysé axiomes et règles de déduction (en fait Euclide l'avait déjà fait pour une des géométries possibles, au moins pour les axiomes). Or, «l'évidence originaire ne peut pas être interchangeée avec l'évidence des "axiomes" ; car les

axiomes sont principalement déjà les résultats d'une formation de sens originaire et ont cette formation elle-même toujours déjà derrière eux» [Husserl, 1933 : p. 192-193]. Pour cela, on a essayé plus haut de comprendre "l'évidence" de l'axiome des parallèles par une symétrie intuitive, comme "évidence originaire", malgré une certaine "indifférence mathématique" de cette symétrie. Mais il en est ainsi aussi pour les autres axiomes de la géométrie élémentaire :

- on peut construire un et un seul segment entre deux points,
- sur le plan, on peut construire un et un seul cercle une fois donné un point et une distance, etc. ...

Encore une fois, l'évidence originaire est dans ces régularités du monde et de notre action dans le monde qui sont "derrière" ces axiomes (dans le sens de Husserl) : ces deux types de régularités représentent la situation la plus symétrique ainsi que les trajectoires minimales (les géodésiques) pour une distance entre deux points et pour contenir une surface.

Mais ces trajectoires, nous explique A.B., sont d'abord des prédictions. C'est dans ce sens alors que j'arrive à partager, en la révisant, la vision néo-kantienne de nombreux philosophes contemporains :

- la géométrie est *synthétique* en tant qu'elle anticipe l'expérience de l'espace et qu'elle la rend intelligible (voir [Petitot, 1987], [Boi, 1995], par exemple) ; mais elle l'anticipe, selon moi, non pas comme idéalité préexistante, *elle l'anticipe dans l'action*, à partir de la mémoire constituée aussi dans la phylogenèse, et elle la rend intelligible à partir de l'intégration multisensorielle et par la synthèse de différentes expériences : la signification est tout d'abord dans le réseau interconnecté de nos formes de connaissance (qui commence, mais ce n'est qu'une tout petite brique initiale, par les rapports qui s'établissent entre phénomènes différents dans les neurones multimodaux) ;

- la géométrie est *a priori*, non pas à cause de la caractérisation formelle de nos espaces à partir de quelques concepts fondamentaux, car je ne connais pas des systèmes formels "catégoriques" ou complets par rapport au monde ; mais elle est *a priori*, puisque son fondement est dans le processus constituant qui est derrière nous et derrière nos axiomes explicites, ce processus qui est démarré avec notre rapport évolutif d'êtres vivants aux régularités du monde.

Ces régularités et leur analyse sont au coeur de la "genèse" ainsi que de "l'épistémologie" de (ce fragment de) la géométrie ; tandis que les trois axiomes que l'on a examinés sont notre choix spécifique, un pari non-arbitraire que nous avons fait pour parler de l'espace, mais ils ne sont pas le "fondement" de la géométrie : l'analyse logico-formelle de leur cohérence, par exemple, est *nécessaire*, mais elle n'est pas *suffisante* à l'analyse fondationnelle (voir §.6). Leur fondement, qui est commun aux autres géométries que l'homme a proposées dans

l'histoire, est dans la dynamique évolutive et historique qui les a engendrées. Cette dynamique commence dans l'interface entre l'action de l'homme et certaines régularités du monde, comme les symétries ou d'autres, dont on n'a pas parlé, comme la *connexion* de l'espace, en tant que variété tridimensionnelle, et les *transformations* que nous donne le mouvement et que nous pouvons organiser dans un groupe algébrique.

Il faut comprendre, pour saisir ce changement de perspective, que la géométrie n'est pas, ou n'est plus, surtout depuis le grand débat du siècle dernier, une "science des figures" mais "une science de l'espace" (Riemann). En fait, elle est une science du mouvement dans l'espace (Poincaré). Or, on peut plus précisément se demander dans quel sens elle peut être une "abstraction perceptive", qu'est ce que cet "invisible qui sous-tend le visible" (pour paraphraser Merleau-Ponty). Je crois que aujourd'hui on peut considérer la géométrie, grâce aux percées des biologistes et des physiologistes, comme une science de l'action et de la *prévision* du mouvement dans l'espace : le segment, la courbe, le cercle ne sont pas la "forme abstraite" (?) d'un objet matériel, ni des "figures idéales" (?), mais plutôt la *prévision* d'un parcours. *Et la prévision est déjà une abstraction ; la trajectoire prévue ou anticipée par le regard et le geste est abstraite.* Voici ma thèse principale.

Autrement dit, *l'acte de prévoir, anticiper* une trajectoire constitue le fondement antique, l'embryon pré-humain de *l'abstraction géométrique* humaine, l'origine cognitive de ces lignes que nous savons concevoir sans épaisseur, car elles sont des pures directions, de ces courbes parfaitement lisses et optimales, car elles sont des pures trajectoires ; mieux, elles sont des prévisions de trajectoires. Et cet acte *est là*, non seulement dans la praxis, mais aussi dans la mémoire phylogénétique de notre rapport à l'espace (certains neurones visuels s'activent pour des "directions" dans l'espace). On l'utilisera, peut-être, aussi pour former des figures par interpolation, pour suivre ou reconstruire des contours en intégrant leur perception visuelle, vers cette géométrie des formes qui est une partie de celle de l'espace. Le langage s'y ajoutera, en donnant l'objectivité de la construction commune ; mais le dessin aussi, par le regard qui anticipe le geste de la main ; l'histoire enfin contribuera à constituer l'invariance et la stabilité conceptuelle propre à la construction mathématique, grâce aussi à la pluralité d'expériences pratiques et de descriptions linguistiques et formelles.

Remerciements

Je voudrais remercier Jean Petitot et Yves-Marie Visetti pour leurs commentaires et leur encouragement.

Bibliographie

- Boi L. (1995) *Le problème mathématique de l'espace*, Springer.
- Fruchart T., Longo G. (1998) "Carnap's remarks on Impredicative Definitions and the Genericity Theorem" in X Conference on Logic, Methodology and Philosophy of Science, Cantini et al. (eds.), Kluwer.
- Girard J.-Y., Lafont Y., Taylor P. (1989) *Proof and Types*, Cambridge Univ. Press.
- Goldfarb W. (1986) "Poincaré Against the Logicians" *Essays in the History and Philosophy of Mathematics*, (W. Aspray and P. Kitcher eds), *Minn. Studies in the Phil. of Science*.
- Harrington L. et al. (eds) (1985) *H. Friedman's Research on the Foundations of Mathematics*, North-Holland.
- Herken R. (1995) *The Universal Turing Machine*, Springer-Verlag.
- Husserl E. *L'origine de la Géométrie*, 1936 (trad. française de J. Deridda, PUF, 1962)
- Iversen B. (1989) *An invitation to geometry*, Aarhus University Press.
- Longo G. (1995) "Memory in Mathematics", *Revue de l'Association H. Poincaré*, vol. 2.
- Longo G. (1998) "The mathematical continuum, from intuition to logic" in *Naturalizing Phenomenology: issues in contemporary Phenomenology and Cognitive Sciences*, (J. Petitot et al., eds) Stanford U.P.
- Longo G. (1999 à paraître) "Cercles vicieux, Mathématiques et formalisations logiques", in *Logiques et Sciences Humaines*, Paris.
- Petitot J. (1987) "Objectivité faible et philosophie transcendantale", dans *Physique et Réalité*, M. Bitbol, S. Laugier (eds), pp. 201-236, Diderot.
- Poincaré H. (1902) *La Science et l'Hypothèse*, Flammarion, Paris.
- Poincaré H. (1905) *La valeur de la Science*, Flammarion, Paris.
- Prochantz A. (1997) *Les anatomies de la pensée*, Odile Jacob.
- Weyl, H. '1967) "Comments on Hilbert's second lecture on the foundations of mathematics." [1927] in van Heijenoort J., *From Frege to Goedel*.
- Weyl H. (1952) *Symmetry*, Princeton University Press.

John STEWART*** — *Odeurs, cognition, transduction*

Les odeurs sont des entités particulièrement intéressantes du point de vue de l'épistémologie des sciences cognitives, car elles fournissent l'exemple-type d'un objet de cognition qui n'existe pas en dehors de sa relation à un sujet doté de capacités neurophysiologiques particulières. Elles permettent donc de reprendre le débat sur l'ontologie et en particulier sur l'objectivisme, en le nourrissant de données expérimentales récentes et intéressantes. En effet, comme le montre le dossier thématique dans le dernier numéro d'*Intellectica* (Dubois & Holley 1997), le domaine de l'olfaction fait actuellement l'objet de recherches intenses.

En effet, l'une des questions les plus fondamentales dans le champ des sciences cognitives, à laquelle aucune théorie dans ce domaine n'échappe, concerne la nature de ce qui *est* : la question ontologique par excellence. Ainsi, toute *épistémologie* — théorie concernant la connaissance et le "comment" du fonctionnement cognitif — présuppose nécessairement une *ontologie* — postulat métaphysique concernant le "quoi", la réalité qui doit bien exister afin de pouvoir être connu. L'ontologie la plus répandue est l'objectivisme, le postulat selon lequel le réel existe, et est ce qu'il est, indépendamment de toute relation avec un sujet épistémique. En particulier, le cognitivisme classique — la théorie computationnelle de l'esprit — est nécessairement objectiviste (bien que cela ne soit pas souvent explicité) pour la raison suivante. Selon cette théorie, la cognition est définie comme la manipulation de représentations symboliques selon les règles d'une syntaxe formelle. Les symboles, étant par construction purement formels, ne possèdent aucun contenu sémantique intrinsèque. Par conséquent, afin que ces opérations syntaxiques accèdent au statut de fonctionnement cognitif, il est nécessaire de doter après coup les symboles d'un contenu sémantique en vertu de leurs relations de correspondance avec des référents. Or, pour le cognitivisme classique, ces référents ne sont autres que des aspects du réel. Afin précisément de jouer comme référent pour l'ancrage des symboles, ce "réel" doit bien exister en tant que tel, indépendamment de toute relation avec des

*** COSTECH, Université de Technologie de Compiègne
E-mail : John.Stewart@utc.fr

sujets épistémiques ; ce qui nous ramène à la définition même de l'objectivisme².

Malgré sa réfutation par la critique kantienne, la croyance objectiviste reste tenace, et ce en grande part parce que les ontologies alternatives semblent absurdes. L'exemple historique le plus connu est l'idéalisme solipsiste de Berkeley, à savoir la thèse selon laquelle *exister* et *être perçu* sont une seule et même chose (Russell 1946). Le corollaire provocant de cette thèse est qu'un arbre, par exemple, cesserait d'exister si personne ne l'observait. Les arguments de Berkeley sont astucieux, et remarquablement difficiles à réfuter : toute tentative de démontrer l'existence d'un objet "non-perçu" risque de constituer elle-même un mode de perception, et donc de se retourner contre son auteur en illustrant précisément la justesse de la thèse berkeleyenne. Néanmoins, l'absurdité de cette thèse est telle qu'en fin de compte, l'ultime retournement se fait en faveur de l'objectivisme, qui se trouve ainsi conforté.

Pour sortir de cette impasse, il est donc intéressant d'inverser la question et de se demander si l'on ne pourrait pas identifier certains objets, ne serait-ce que quelques-uns à titre illustratif, dont il ne serait *pas* absurde de considérer qu'ils n'existent pas en l'absence d'un sujet cognitif. C'est ici que l'exemple des odeurs prend toute sa signification. En l'absence d'un sujet doté d'un nez et d'un cerveau, il y aurait peut-être des molécules chimiques, mais il n'y aurait pas *dodeurs* en tant que telles. Les connaissances neurophysiologiques considérables concernant les mécanismes de l'olfaction, dont il est question dans le dossier thématique du numéro 24 d'Intellectica, permettent d'approfondir l'intelligibilité de la situation. En particulier, une molécule chimique — même pure — n'active pas un seul récepteur,

² En fait, le postulat ontologique nécessaire au bon fonctionnement du cognitivisme classique est bien plus fort que le simple objectivisme ; le "réel" ne doit pas seulement exister indépendamment de ses relations avec les représentations symboliques, il doit (à l'instar de la Théorie des Modèles en mathématiques) posséder une structure ensembliste, c'est-à-dire être composé d'objets élémentaires, de classes de ces éléments ayant des propriétés "essentiels" en commun, et de relations n-tuples entre ces éléments. Et même à ce prix, la question de l'ancrage des symboles reste problématique : le critère de la vérité conditionnelle ne suffit pas à valider les "bonnes" relations de correspondance entre symboles et référents, comme Putnam (soulignant l'indétermination du référent) et Quine (mettant en évidence l'opacité du référent) l'ont bien démontré de l'intérieur même de la philosophie analytique. Mais mon propos dans ce jalon n'est pas de critiquer le cognitivisme en particulier ; je souhaite plutôt aborder la question de l'objectivisme en général.

mais déclenche plutôt un *profil* d'activation sur l'ensemble des récepteurs. Ceci explique sans doute pourquoi les sensations olfactives ne comportent pas de distinction catégorielle entre les odeurs déclenchées par des mélanges de molécules, et celles que déclenchent des molécules chimiquement pures. Par ailleurs, la saillance d'une odeur perçue dépend du degré de résonance qui s'établit — ou non — entre le profil d'activation des récepteurs et le réseau de neurones dans le bulbe olfactif. L'objet d'une perception olfactive est bien une *odeur*, et non pas des molécules. Dans l'ensemble, on comprend assez clairement qu'une odeur est une entité qui ne provient ni de la seule réalité extérieure, ni du seul sujet, mais plutôt de leur *relation*.

Afin de consolider cette interprétation des données expérimentales, il est utile de thématiser conceptuellement les entités relationnelles de ce type. Simondon (1989) a proposé d'employer le terme de "transduction" pour désigner une relation dont les deux pôles sont constitués par la relation elle-même, de sorte qu'aucun des pôles ne peut exister sans l'autre. Un exemple simple en est le couple proie/prédateur : une proie n'est proie que dans sa relation à un prédateur (et réciproquement). En ce qui concerne la relation qui nous intéresse ici, entre le sujet et l'objet de la cognition, cette notion de transduction nous permet de prendre des distances tout à la fois par rapport à l'objectivisme et à l'idéalisme. J'appellerai "sujet transductif" et "objet transductif" des entités qui n'existent en tant que telles que dans leur relation réciproque. Contre l'objectivisme, on notera qu'un objet transductif tel qu'une odeur n'existe pas en dehors de sa relation avec un sujet particulier ; mais contre l'idéalisme, on notera que le sujet n'est un sujet cognitif que dans sa relation avec un objet cognitif. Sur le registre philosophique, on rejoint ici la phénoménologie et la notion de visée intentionnelle. Méthodologiquement, la phénoménologie requiert une double "réduction" ou *epoché*. D'une part, la "mise entre parenthèses" de la thèse objectiviste du monde est nécessaire pour accéder à l'analyse précise de l'expérience vécue ; mais d'autre part, cette analyse révèle que la conscience est toujours conscience *de quelque chose*, autrement dit que la conscience n'existe jamais seule en tant que telle³. Ce cas de figure, dont les odeurs fournissent un exemple prototypique, est bien celui de la transduction. Sur le registre des sciences naturelles, on remarquera que si de simples molécules chimiques ne sont pas des *odeurs*, une entité qui n'existerait que dans un

³ Par conséquent, contrairement à ce que pensait Descartes, la conscience n'est pas une substance (*res cogitans*) ; sa nature est relationnelle.

rêve ou une hallucination ne le serait guère plus. En effet, les odeurs (comme les autres objets cognitifs) résultent d'un couplage structurel entre un organisme et son monde propre (Varela et al 1991) ; le fait, bien attesté dans le dossier thématique du numéro 24, que le lexique des odeurs fait souvent référence à une situation (par exemple "l'odeur de l'herbe coupée", "l'odeur de la viande pourrie", etc.) est particulièrement éloquent à ce propos.

Si l'on admet donc que les odeurs fournissent l'exemple d'un objet qui n'existe pas en l'absence d'un sujet cognitif, la question qui suit est évidemment de savoir s'il s'agit d'un cas isolé, ou s'il est possible de le généraliser ; et si oui, jusqu'où. Dans ce court jalon, je ne peux qu'esquisser les grandes lignes de l'argument.

La position la plus répandue, encore aujourd'hui, est peut-être la doctrine de Locke qui établit une distinction entre qualités "primaires" (solidité, extension, mouvement, nombre) et qualités "secondaires" (couleurs, sons, odeurs, etc.) (Russell 1946). En fait, il est assez généralement admis, depuis Locke, que les qualités secondaires n'existeraient pas sans un sujet cognitif⁴. Ainsi, les sons ne peuvent être identifiés à des molécules d'air en mouvement car dans ce cas, comme le faisait remarquer Berkeley, on pourrait peut-être les voir mais on ne pourrait certainement pas les *entendre*. De même, les couleurs ne peuvent être identifiées à des ondes électro-magnétiques ; voir Varela et al (1993) pour une discussion approfondie. Mais s'il est assez clair que les qualités secondaires sont transductives, qu'en est-il des qualités primaires ?

De fait, la doctrine des qualités "primaires", intrinsèques aux objets eux-mêmes, est probablement la position de repli majeure de l'objectivisme. Mais, comme le faisait déjà remarquer Berkeley, le dualisme de Locke est incohérent, car les arguments concernant les qualités secondaires s'appliquent tout autant aux qualités primaires (Russell 1946). En effet, de nombreuses expérimentations contemporaines confirment que le mouvement et l'espace, *tels qu'ils sont perçus*, sont inséparables du sujet cognitif. On citera, à titre illustratif : le phénomène "phi" ou "mouvement apparent", connu depuis

⁴ Il convient toutefois de prendre des distances par rapport à la formulation classique, selon laquelle les qualités secondaires existeraient "dans" le sujet de la perception. Comme je l'ai déjà remarqué, le concept de "transduction" souligne le fait que les qualités secondaires sont relationnelles, et n'existent guère plus dans le seul sujet que dans le seul "monde objectif".

1875 (Kolers 1972, Dennett 1993) ; les expériences de substitution sensorielle qui montrent qu'une perception "distale" des objets "situés là-bas dans l'espace" ne se produit que si les retours sensoriels résultent des actions du sujet lui-même (Bach-y-Rita 1962, Lenay et al. 1997) ; et les travaux sur la nouveauté chez les animaux (de Gaulejac et Gallo 1996), qui montrent que la perception des objets est inséparable d'une "acto-spatialité" spécifique à l'espèce.

Si l'on considère que les qualités primaires et secondaires sont finalement de même nature, étant toutes les deux des objets transductifs, cela permet d'aborder la question des *qualia*, la qualité particulière d'une perception telle qu'elle est vécue par un sujet cognitif. Nous avons vu que Berkeley considérait que les sons ne peuvent être identifiés à des molécules d'air en mouvement, car dans ce cas on pourrait peut-être les voir mais on ne pourrait certainement pas les *entendre*. Le concept de relation transductive permet une formulation plus nuancée : "entendre" consiste à percevoir des molécules d'air en mouvement *d'une manière particulière*, par le biais d'un organe sensoriel *particulier*, en l'occurrence l'oreille avec son tympan, les osselets, etc. En fait, ce qui est important n'est pas l'organe sensoriel en tant que tel, mais le mode de couplage sensori-moteur qu'il instaure entre l'organisme et son milieu. Ainsi, les aveugles dans les expériences de Bach-y-Rita "voient" (c'est-à-dire perçoivent des objets situés "là-bas" dans l'espace) non pas avec leurs yeux, mais moyennant le dispositif d'une vidéo-caméra reliée par une boîte électronique à une matrice de stimulations tactiles sur la peau — à *condition* que les aveugles puissent eux-mêmes bouger dans l'espace de telle sorte que leurs mouvements produisent en retour des effets systématiques sur les stimulations sensorielles. Il est à noter que dans ces conditions, le picotement sur la peau disparaît de la conscience, pour céder le pas à une perception des "objets là-bas" — de même que quand nous voyons *avec* les yeux nous n'avons aucune conscience de la stimulation rétinale.

Dans le même ordre d'idées, il est peut-être possible de risquer une réponse à la question de Nagel : "Quel effet cela fait-il d'être une chauve-souris ?" Dans la mesure où les chauves-souris utilisent leur système de reflets ultrasoniques comme un dispositif de couplage sensori-moteur leur permettant de voler dans l'espace en évitant des obstacles et en attrapant des proies, il y a lieu de penser que leurs *qualia*, la qualité de leur expérience vécue, serait finalement assez semblable à celle de la vision des oiseaux. En fait, les différences proviendraient plus des différences dans l'aérodynamique du vol, que du

fait que les chauve-souris "voient" avec leurs oreilles plutôt qu'avec leurs yeux.

En conclusion, si on abandonne la distinction entre qualités primaires et secondaires, on peut se demander où se situent les limites de la cognition transductive ? Dans les faits, on peut constater que la croyance objectiviste est encore très solidement implantée en ce qui concerne les objets de la science : atomes, gènes, molécules chimiques, ondes électromagnétiques, etc. s'imposent à nous comme des objets qui existent en tant que tels indépendamment de toute relation à un observateur. Mais même ce dernier camp retranché n'est pas à l'abri des assauts d'un constructivisme radical. Latour et Woolgar (1988) ont ainsi montré que les "faits scientifiques" sont le résultat d'un processus de construction à la fois épistémique, technique et social, dont la dernière étape consiste en une ré-écriture narrative de l'histoire des sciences qui efface très précisément les traces de cette construction au profit d'une rhétorique de la "découverte" d'objets pré-existants. Dans le même esprit, Merleau-Ponty (1942) qualifiait déjà l'objectivisme d'"erreur bien fondée"; et Rastier (1991) a finement analysé la constitution de l'"impression référentielle". Mais plutôt que de trancher, je préfère laisser la question ouverte : y a-t-il un lieu où l'ontologie objectiviste reste tenable ?

Références

- Bach-y-Rita P. (1962). *Brain Mechanisms in Sensory Substitution*. Academic Press, New York.
- Dennett C. (1993). *La conscience expliquée*. Odile Jacob, Paris.
- Dubois D. & Holley (1997). Olfaction : du linguistique au neurone, *Intellectica* 24
- de Gaulejac F. et Gallo A. (1996). L'animal et la nouveauté : représentation ou acto-spatialité. *Intellectica* 22, pp 169-184.
- Kolers P.A. (1972). *Aspects of motion perception*. Pergamon Press, Oxford.
- Latour B. et Woolgar S. (1988). *La vie de laboratoire : la production des faits scientifiques*. Ed Découverte, Paris.
- Lenay C., Cannu S. & Villon P. (1997). Technology and perception : the contribution of sensory substitution systems, *Second International Conference of Cognitive Technology, Aizu, Japan, Los Alamitos : IEEE.*, pp 44-53.
- Merleau-Ponty M. (1942). *La structure du comportement*. PUF, Paris.
- Rastier F. (1991). *Sémantique et recherches cognitives*. PUF, Paris.

Russell B (1946). *History of Western Philosophy*. Routledge, London.

Simondon G. (1989). *L'individuation psychique et collective*. Aubier, Paris.

Varela F., Thompson E. et Rosch E. (1993). *L'inscription corporelle de l'esprit*. Editions du Seuil, Paris.

André HOLLEY**** — *L'odeur est-elle un objet cognitif relationnel ?*

Les données scientifiques nouvelles arrivent parfois comme un vent frais qui souffle sur les braises des vieux débats philosophiques. Le souffle des sciences cognitives a déjà réactivé quelques brasiers. Pour autant, rares sont les conquêtes de l'empirie qui ébranlent l'équilibre des thèses en présence et infléchissent le cours des idées tenues pour vraies au point de faire triompher un camp et de laisser l'autre sans voix. Les philosophes n'ont-ils pas un génie particulier pour métaboliser la nouveauté et ré-installer dans le domaine du déjà-pensé les arguments les plus inédits en apparence.

John Stewart (ce numéro) décèle un parfum de nouveauté dans les travaux récents sur les odeurs rapportés dans le précédent numéro d'Intellectica⁵ et tire argument des propriétés de la perception olfactive pour porter un coup supplémentaire à la «croyance objectiviste» présentée comme ontologie obligée du cognitivisme classique. L'argument inspiré par les études d'olfaction est en substance le suivant : l'objet d'une perception olfactive est une odeur ; or une odeur est un objet relationnel, un objet qui n'existe pas en dehors de la relation entre un sujet et un objet ; il existe donc au moins un objet de cognition qui n'a pas d'existence en l'absence d'un sujet cognitif.

Passons sur le fait qu'un cygne noir n'a jamais empêché les autres cygnes d'être blancs et que la «croyance objectiviste» peut très bien se remettre d'un exemple contraire. Mais le cygne est-il vraiment noir ? L'objet de la perception olfactive est-il aussi clairement relationnel qu'il nous est présenté ?

Il n'est pas question ici d'entrer dans le débat ontologique mais d'analyser ponctuellement l'affirmation centrale de la thèse de Stewart et d'y ajouter quelques réflexions sur les raisons qui peuvent faire penser que la perception olfactive se prête mieux qu'une autre à la mise en question du présupposé objectiviste.

**** Laboratoire de Neurosciences et Systèmes sensoriels, Université Claude-Bernard, Lyon 1.

E-mail : holley@olfac.univ-lyon1.fr

⁵ 1997/1, n° 24 Olfaction : du linguistique au neurone

Que l'expérience sensorielle désignée comme «odeur» soit le résultat d'une interaction entre le monde et le sujet qui le perçoit est une proposition tout à fait acceptable. Il n'y aurait pas d'odeur sans molécules volatiles, sans récepteurs pour les détecter et sans appareil neuronal pour élaborer la sensation correspondante. Admettons aussi, comme le fait Stewart, que malgré leur rôle causal indéniable dans l'excitation de l'organe sensoriel les molécules ne sont pas le véritable objet de la perception olfactive. Les organismes qui règlent leur comportement sur les signaux olfactifs que leur adresse leur environnement ignorent ces entités chimiques construites par la pensée scientifique. Mais cela nous autorise-t-il pour autant à faire de l'odeur, c'est-à-dire de l'interaction seule, l'objet de la perception ? Que sont donc les fleurs et les charognes, que sont donc les miasmes et la jonquille, sinon des objets pour la perception olfactive ? La perception olfactive aurait-elle deux catégories d'objets, certains relationnels et d'autres qui ne le seraient pas ?

L'odeur est assurément de l'ordre de la sensation et l'on ne voit pas en quel sens il serait possible de faire d'une sensation un objet de perception. Si le langage courant légitime l'expression «perception des odeurs» — il parle aussi de la perception des couleurs et de celle des sons — n'est-ce pas à la faveur d'une ambiguïté sémantique qu'il conviendrait de lever et non pas d'entretenir ?

Il est intéressant, cependant, de s'interroger sur l'origine de cette ambiguïté qui consiste à utiliser le même terme pour désigner la substance matérielle qui agit sur l'organe sensoriel et l'état mental qui en résulte chez le sujet. La perception olfactive doit avoir certaines propriétés qui entretiennent la confusion.

Il faut reconnaître que dans le cas de l'odeur, l'objet du monde qui cause la sensation est particulièrement évanescent. Les vapeurs odorantes n'ont pas toujours une origine identifiable car elles diffusent loin de leur lieu d'émission. La matière dont elles émanent n'est pas nécessairement structurée. Surtout, l'objet-source n'est que rarement accessible aux autres sensorialités, celles qui servent de références «objectives» aux primates visuo-tactiles que nous sommes. La vision et le toucher se confortent mutuellement. Lorsque l'oeil prédit très précisément le contour de l'objet que la main effleure, lorsque la pulpe des doigts, cette «fovea tactile», confirme la texture lisse ou rugueuse de la surface palpée, l'image visuelle s'impose comme manifestation d'une réalité extérieure au sujet percevant. Il n'en va pas de même pour l'image olfactive que l'on est tout naturellement porté à classer du côté

de «l'éprouvé» et du «ressenti» faute d'identifier clairement le référent de ce symbole.

On en vient donc à se demander si ce n'est pas en raison d'une excessive référence aux propriétés des objets de la vision, dont la primauté est indéniable pour notre espèce, que l'on refuse un statut d'objet aux manifestations olfactives. Que les objets qui peuplent le monde de la perception olfactive ne soient pas toujours superposables aux objets qui peuplent notre monde visuel n'implique pas que le sujet renonce à situer hors de lui même l'origine des sensations qu'il éprouve. Stewart tire argument d'expressions telles que «odeur de l'herbe coupée» ou «odeur de viande pourrie» qu'il juge faire référence à une *situation* (plutôt qu'à un objet) pour appuyer son propos sur le caractère purement relationnel, *transductif*, de l'olfaction. Mais pourquoi l'herbe coupée ou la viande pourrie seraient-elles plus «relationnelles» lorsqu'elles se manifestent à l'odorat qu'elles le sont lorsqu'elles se manifestent à la vue ?

Autrement dit, l'odeur est une représentation et à ce titre il est vrai qu'elle implique une relation entre un objet et un sujet mais il est douteux qu'elle soit elle-même un *objet* cognitif et qu'elle le soit davantage qu'une couleur et un son.