ALAIN BERTHOZ

Professeur au Collège de France
Chaire de physiologie de la perception et de l'action
Membre de l'Académie des Sciences – Institut de France
Président de l'Institut de Biologie du Collège de France
Directeur du LPPA

Depuis la rencontre que nous avons eu l'occasion de faire grâce aux enseignants de l'école et à Alain Cadix, nous avons réfléchi ensemble pour élaborer des projets qui soient aux frontières avec, disons, les découvertes récentes, sans arrogance, des sciences de la cognition.

Les sciences de la cognition sont un domaine extraordinairement vaste, puisque leur objectif, depuis une quinzaine d'années, a été de regrouper des disciplines aussi diverses que la philosophie, l'intelligence artificielle, les maths, la neurophysiologie, la psychologie, la logique, etc.

☞ **Nous assistons à un questionnement de toute la société pour retrouver le « sujet » dans le processus de conception des objets.**

Ce défi a été relevé depuis une quinzaine d'années par une communauté qui aujourd'hui rassemble, dans la région parisienne, près de 800 chercheurs toutes disciplines confondues. Récemment, un travail animé par Jean Lorenceau, de trente ateliers, pour faire le point sur les sciences de la cognition, a identifié plus de 1 500 chercheurs au niveau national. Il s'agit donc d'un domaine qui est en explosion et qui ne peut pas être présenté aujourd'hui uniquement par nous trois.

C'est une petite étape, un petit pas, comme pour le premier pas sur la lune, que nous voudrions faire aujourd'hui ensemble, Alain Cadix, mes collègues et moi, avec vous, pour essayer de voir si on peut aller un peu plus loin.

Je voudrais dire, dans la phase d'introduction de l'exposé que je vais vous faire, que depuis que j'ai publié *La décision*, *Le Sens du Mouvement* et *La simplicité*, depuis qu'un certain nombre de mes collègues ont travaillé dans ce domaine des sciences de la

cognition, nous assistons à un extraordinaire questionnement de toute la société, tous domaines confondus pour retrouver le sujet, l'homme et la femme, leurs émotions dans les processus sociaux et dans les processus de conception des objets.

Il semblerait que l'on sorte d'une période où le formalisme a oublié cette dimension humaine. À la RATP, j'anime un séminaire de prospective. La direction de la RATP m'a dit que les transports en commun avaient été considérés du point de vue des flux et du matériel, et souhaitait remettre le voyageur au centre. Cela donne une idée de l'espèce de retournement formidable qui est en train de se produire, toutes disciplines confondues, pour retrouver le sujet que l'on a souvent oublié derrière une approche rationnelle des processus ! C'est en cela que la partie scientifique, les sciences de la cognition pourraient être l'objet de dialogues entre nous.

☞ **Le cerveau ne se contente pas de recevoir des informations, il projette sur le monde ses interprétations et ses hypothèses.**

Si l'on s'en tient à la vision comme analyse des formes visuelles, je voudrais vous rappeler qu'il y a, à partir de l'image d'un objet ou d'une peinture plusieurs voies visuelles : une grande voie qui passe par la partie supérieure du cerveau, qui identifie où nous sommes, une deuxième voie qui va vers le lobe temporal, qui identifie le quoi, qui reconstruit le visage de chacun d'entre vous ou les objets, et qui est spécialisée dans l'identification des objets, puis une troisième voie qui va vers la structure appelée l'amygdale, qui est fondamentale pour l'émotion. C'est la structure qui fait que vous trouvez un visage sympathique ou pas, dangereux ou pas. Elle attribue immédiatement à l'objet, à sa forme, une valeur de survie, bonne ou mauvaise. Cette attribution de valeur est ensuite évaluée dans des structures extrêmement importantes comme le cortex orbito-frontal, et tout cela donne lieu à des décisions qui sont travaillées dans la partie antérieure du cerveau, dans le frontal, qui guident ensuite l'action.

Voilà, en 45 secondes, un résumé de la physiologie pour vous montrer l'extraordinaire modularité de l'analyse des formes visuelles. Mais il en est de même pour l'analyse des formes par les autres sens, et leur combinaison.

La perception d'une forme ou d'un objet n'est jamais passive, elle est toujours décision. Quand je regarde les objets et les formes ici, que ce soit la salle, vos visages, vos corps ou les objets, mon cerveau ne se contente pas de les analyser, il décide, il anticipe. Vous décidez que ce que vous voyez est un chien derrière un arbre et non pas deux morceaux de chien.

C'est une décision que prend votre cerveau de reconstruire la forme. Vous

décidez qu'il y a dans les triangles de Kanizsa¹ des formes qui n'existent pas, des triangles, des carrés, des rectangles. Le cerveau impose au monde des formes et des objets, des grilles d'interprétation.

Notre cerveau attribue donc au monde des formes, des propriétés en fonction de ses grilles d'analyse. Le cerveau impose au monde la symétrie et vous savez à quel point il peut déformer les formes réelles du monde pour imposer des règles d'interprétation. C'est ce que j'appelle la tyrannie de la perception.

Le monde est plein de formes ambiguës et le cerveau résout ces problèmes. J'aime bien dire que les illusions sont des solutions que trouve le cerveau dans le cas d'ambiguïtés, ce qui les oppose aux hallucinations qui sont des créations de formes par le cerveau. Un jour mon collègue le grand mathématicien Schwartz est venu me voir, il m'a dit : à côté de la télévision je vois un personnage en habit de hussard. C'était une forme qui était créée par son cerveau. L'hallucination est une création, l'illusion est une solution.

☞ La perception est décision.

Autre problème intéressant, pour nous en tout cas: les formes ne sont pas forcément statiques, cela peut être soit des formes en mouvement, soit des formes qui produisent des mouvements, soit des formes qui expriment le mouvement, une trajectoire; par exemple la forme que je crée avec ma main. Un danseur crée une forme, une morpho-cinèse, comme disent certains. Cette perception de la forme d'un mouvement est contrainte par des lois de la production par le cerveau du mouvement.

Il y a toute une série de travaux récents extrêmement intéressants à ce sujet. Il faut citer notamment les neurones miroirs, c'est-à-dire des neurones qui codent aussi bien la production d'un mouvement que la perception du mouvement. Cela a été découvert chez le singe et vérifié chez l'homme. Nous avons dans le cortex frontal des neurones qui déchargent avant que je fasse un geste; ce sont des neurones qui préparent un geste spécifique; mais si vous faites le même geste, le même neurone va s'activer dans mon cerveau. Autrement dit, la perception que j'ai de votre geste est simulée dans mon cerveau par les mêmes neurones que ceux qui vont produire le geste.

Lorsque nous créons des formes avec la main, avec le corps, en dansant ou même en fabriquant un objet qui souvent reflète le geste, l'évolution a trouvé des lois pour simplifier le contrôle du geste. Les sciences cognitives ont identifié toute une série de lois dont la vocation est de simplifier le contrôle du geste. Lorsque je fais un mouvement elliptique, un mouvement naturel, il y a une relation très simple entre la courbure de mon mouvement et la vitesse tangentielle. Tout mouvement naturel, y

¹ Le motif de Kanizsa est une illusion d'optique cognitive publiée en 1955 par Gaetano Kanizsa.

compris ceux que nous faisons avec les mains, obéissent à cette loi extrêmement stricte, dite loi de la « puissance $2/3$ ».

☞ J. Koenderink a montré que le cerveau utilise des géométries non-euclidiennes pour la perception des surfaces et des formes des objets.

Elle est aussi valable pour la locomotion. Si vous créez une forme locomotrice comme un danseur, si vous mesurez la vitesse tangentielle le long de la trajectoire et la relation avec la courbure, on trouve aussi cette loi. Viviani un de nos collègues, a montré que si on vous demande si le mouvement de ce doigt est à vitesse constante, vous ne le percevrez à vitesse constante que si, en réalité, mon doigt change de vitesse, s'il va vite ici et s'il ralentit à la courbure. Autrement dit, les lois de la perception sont contraintes par les lois de la production.

Tout ceci résulte vraisemblablement de principes très généraux de production du mouvement qui ont été appelés par les physiologistes « principes d'équivalence motrice ». On peut dessiner le « a » avec le bout du doigt, le dessiner avec la main, mais on peut aussi le dessiner en courant sur une plage. Ce que découvrent aujourd'hui nos domaines scientifiques, c'est qu'en réalité, cette possibilité de créer la même forme avec des effecteurs aussi différents, et aussi différents en complexité, vient sans doute du fait que le cerveau planifie, organise le geste, le mouvement en fonction de principe très généraux, soit des principes de minimum de secousses, de minimum d'énergie, de souplesse. Le cerveau aime les formes souples.

En réalité, il semblerait que le cerveau ne code pas le mouvement dans une géométrie qui est purement euclidienne, mais qu'il utilise des combinaisons de géométrie euclidienne affine et équi-affine. Tout cela est très compliqué et avait été déjà préfiguré par le physicien, devenu neuroscientiste, Jan Koenderink, en Hollande, qui a montré il y a très longtemps que le cerveau utilise des géométries non euclidiennes pour la perception de l'espace visuel et tactile et la perception des formes des objets.

Il y a donc une espèce de remise en cause du cadre classique de la représentation que nous nous faisons du monde des formes comme étant lié à la géométrie euclidienne, avec l'idée que ces géométries non euclidiennes introduisent aussi toute une dynamique, toute une cinématique.

Une autre découverte qui m'a semblé importante a été faite par Semir Zeki, un neuroscientiste anglais. Il a présenté simplement des formes statiques, des dessins et il a montré que lorsque l'on montre un dessin, fixe j'insiste, il y a une activation de l'aire médio-temporale du cerveau, c'est-à-dire l'aire qui est impliquée

particulièrement dans la perception de la vitesse dans le monde visuel. Lorsque nous voyons une calligraphie nous percevons le mouvement de la main du calligraphe. C'est ce que j'accuse les architectes d'avoir oublié en nous imposant à Bercy par exemple, au Ministère des Finances ou même à la Grande bibliothèque, des formes rectangulaires qui nous empêchent d'avoir le plaisir du mouvement.

☞ La perception du mouvement et de l'action est contrainte par les lois de la production du mouvement.

C'est pourquoi j'aime beaucoup cette architecture d'Andreu qui allège de façon extraordinaire et qui donne un mouvement que je perçois. Je le vis, je me promène mentalement dans ces formes extraordinaires.

Le cerveau a des systèmes différents pour l'action dans des espaces différents. L'espace est utilisé aussi depuis très longtemps pour stocker des concepts, des idées. On trouvera dans les livres de Frances Yates et de Mary Carruthers des études sur l'utilisation des espaces architecturaux pour la mémoire. Mary Carruthers suggère aussi que l'architecture des églises, des abbayes, organise la connaissance des moines sur la Bible. John Schied a trouvé un manuscrit romain qui contient des recommandations sur les règles sociales et qui utilise comme fil rouge une promenade dans Rome, de monument en monument etc.

On ne perçoit pas les objets de la même façon en fonction de leur distance. Pourquoi ? Parce que notre cerveau traite des espaces avec des réseaux neuronaux différents. Je traite la forme de cet ordinateur et ce qui se passe autour de moi ici avec un certain réseau. Si on pointe avec un laser vers un écran à 70 centimètres, on active un réseau dans le cerveau. Si on pointe avec le laser vers un écran à 2 mètres seulement, on active un autre réseau. Quand j'observe ce qui se passe ici autour de moi, quand je vous observe ou quand j'essaie de réfléchir à cette pièce, ou même à la ville de Paris, ce sont des réseaux différents qui travaillent. Nous ne savons pas encore exactement pourquoi, mais il est possible que ces réseaux ne travaillent pas dans les mêmes géométries et que nous n'ayons donc pas les mêmes grilles d'interprétation pour les différents espaces.

On oublie souvent, quand on conçoit des formes, que selon que cette forme, cet objet ou ce lieu dans lequel on fait vivre les gens fait impliquer des espaces proches ou lointains, nous n'allons pas traiter ces formes, ou les usages que nous en faisons, de la même façon, avec le même réseau dans notre cerveau.

Nous avons aussi plusieurs façons d'appréhender ou de mémoriser les espaces dans lesquels nous évoluons. Par exemple, nous pouvons nous rappeler un trajet en évoquant notre mouvement, les événements qui sont survenus, (mémoire dite

épisodique), c'est ce que nous appelons le point de vue « égocentré » et une stratégie de « route ». Mais nous pouvons aussi nous rappeler notre trajet en évoquant une carte, nous appelons cette stratégie cognitive « allocentrée », grâce à une stratégie de « survol ». Nous utilisons beaucoup la réalité virtuelle pour étudier les bases neurales de ces stratégies. Vous avez peut-être remarqué qu'aujourd'hui, les GPS ne montrent plus la carte de la ville, ils ne montrent pas non plus le trajet dans ce que nous appelons la route de façon « égocentrée ». Les GPS montrent maintenant les objets que sont les villes ou les lieux dans une perspective oblique.

☛ **Le cerveau utilise des réseaux différents pour l'action dans des espaces différents. L'espace et la forme des espaces sont utilisés pour la mémoire.**

Nous savons que ce sont des réseaux différents du cerveau qui traitent les stratégies de routes ou les stratégies de cartes. La stratégie oblique permet vraisemblablement d'encoder les lieux dans notre cerveau, dans ces différents réseaux, et ensuite pour l'usage, puisque le design c'est l'usage, d'aller éventuellement utiliser ces encodages en utilisant les stratégies différentes du cerveau. Peut-être est-il intéressant aussi de tenir compte de ces différentes stratégies du cerveau lorsqu'on conçoit des aides à la navigation.

Nous travaillons aussi actuellement avec EDF, à la fois sur ces espaces d'une complexité fantastique que sont les centrales nucléaires. Ces centrales sont des « lieux objets » dont le design est encore entièrement à concevoir. Nous travaillons actuellement avec les équipes de réalité virtuelle d'EDF pour essayer de comprendre les stratégies de navigation dans ces lieux dans lesquels les gens sont complètement perdus, car la disposition des machines, le design, ou plutôt l'absence de design, y est faite en fonction de caractéristiques techniques mais pas du tout en fonction des capacités qu'ont les hommes, les travailleurs d'aller s'y retrouver.

Pour finir, voici quelques pistes sur des domaines d'application des sciences de la cognition en interface avec des gens qui fabriquent des objets :

☛ **Quelques exemples de sujets possibles de coopération.**

Dans le sud de l'Italie, avec une alliance entre le département de mécanique de l'Université *La Sapienza*, et l'hôpital pour enfants, pour la rééducation des enfants infirmes moteurs cérébraux, nous travaillons sur la conception d'une petite plate-forme qui permet d'étudier la posture, la perception et la mémoire vestibulaire de ces enfants.

Dans notre laboratoire, nous composons des ensembles qui permettent de combiner mouvements du corps et réalité virtuelle pour des tâches d'étude des stratégies de navigation, mais aussi de rééducation, en permettant au sujet de se déplacer, c'est-à-dire de faire des mouvements qui lui permettent de naviguer mais en même temps d'être actif. On bricole des ensembles, mais étant donné que ces choses sont utilisées actuellement pour la remédiation, il y a peut-être tout un design à créer pour ces méthodes nouvelles faisant intervenir à la fois le corps du sujet en action et ces mondes virtuels.

Nous construisons des villes virtuelles, dans lesquelles on étudie les représentations égocentrées ou allocentrées, comme on le fait en voiture quand on passe de la conduite automobile au GPS. Il y a un problème d'intégration des deux. Dans l'aviation, on a fait des casques qui intègrent le réel et le virtuel (réalité augmentée), certaines automobiles le font, mais il y a là un problème intéressant d'intégration du réel et du virtuel.

Il y a beaucoup de travaux sur l'utilisation de ces technologies pour la réhabilitation de l'anxiété, l'agoraphobie, mais cela reste un grand défi puisque, aujourd'hui, ces techniques sont employées à la maison. C'est fait au Danemark, par exemple. J'ai visité un centre qui fait de la télé-rééducation pilotée par le centre de rééducation. Demain, peut-être, les médecins à Paris piloteront-ils des rééducations même dans des pays où il faudra faire des designs pas chers, en Afrique, en Asie, dans des pays qui ne peuvent pas se payer des technologies très élaborées. Donc il existe tout un champ nouveau de transfert vers des technologies moins chères mais pratiques, qui permettent d'exposer les gens avec des méthodes de réalité virtuelle interactives pour la remédiation, la réhabilitation personnelle.

☞ Les humanoïdes? Faut-il donner une forme humaine? La « mobilité ».

Je termine par un autre monde dans lequel je suis plongé, dont je n'ai pas parlé la dernière fois, celui des humanoïdes. Des formes de créatures artificielles, dans notre culture occidentale, sont craintes à cause du mythe du Golem, que vous connaissez. Au Japon, ce n'est pas du tout le cas, on aime les formes artificielles.

Un des défis, par exemple, dans tous les programmes qui existent actuellement sur les humanoïdes, est : faut-il donner ou pas une forme humaine à ces humanoïdes. Je crois que votre école est impliquée avec ALDEBARAN dans le programme ROMEO issu de leur travail sur le petit humanoïde NAO, qui avait une forme semi-humaine. Beaucoup de sujets intéressants de design apparaissent autour de la robotique

humanoïde et, de façon plus générale, autour de la robotique dans tous ses domaines. Nous avons été envahis par les technologies de l'information et de la communication, demain nous allons être envahis de robots de toutes tailles et de toutes fonctions. Cela va aussi être en relation avec le domaine émergent de la « Mobilité », concept très actuel qui recouvre aussi bien la marche que les transports dans tous leurs moyens qui seront l'objet de nombreuses innovations. De nouveaux champs de coopération vont naître entre Sciences Cognitive et Robotique.

Le design y aura un rôle majeur.

Berthoz, A. (2003) : « La décision », Odile Jacob, Paris, pp.391. Berthoz, A. (1997) : « Le Sens du Mouvement », Odile Jacob, Paris, pp.345. Berthoz, A. (2009) : « La simplicité »; Collection Science, O. Jacob, 2009, Paris, 256 p. Translation 2011 Simplexity Yale Univ Press. Berthoz, A. (2000) : « The brains sense of movement (Perspectives in cognitive neuroscience) », Harvard University Press, pp.352. Berthoz, A. (2006) : "Emotion and reason: the cognitive neuroscience of decision making", trad. G.Weiss, Oxford University Press, pp.312. Berthoz, A., Recht, R. (2005) : « Les espaces de l'homme », Berthoz, A., Recht, R (eds), Odile Jacob, Paris, pp.394. Berthoz, A., Vercher, J.-L. (2006) : « Le traité de la réalité virtuelle, volume 1 : L'homme et l'environnement virtuel », Les presses de l'École des Mines de Paris, Collection Sciences Mathématiques et Informatique, pp.380. Berthoz, A., Ossola C., Stock, B. (dir.)(2010) : « La pluralité interprétative » (« Conférences »), mis en ligne le 24 juin 2010. URL : <http://conferences-cdf.revues.org/154>. Berthoz, A. et Cloty : « Travail, identité, métiers : quelles métamorphoses ? » postcast d'un colloque du Collège de France (2009).