

JACQUES DROULEZ

Médecin et directeur de recherche au CNRS

ALAIN BERTHOZ - *Jacques Droulez est polytechnicien, médecin et directeur de recherche au CNRS. Il anime dans notre laboratoire depuis longtemps une équipe qui a travaillé à la fois sur la perception des formes visuelles et la modélisation mathématique des interactions multi-sensorielles. Il a été aussi membre d'un certain nombre de projets de robotique européens, aux frontières neurosciences/robotique, sur des problèmes à la fois de navigation et de perception. Il est un homme de grande culture.*

JACQUES DROULEZ - *Merci de cette présentation flatteuse. Je dois beaucoup au travail de recherche qu'a mené Alain Berthoz. Je ne vais faire que répéter de façon plus modeste, avec un éclairage différent, ce qu'il vient de nous présenter.*

☞ **Percevoir l'invisible. Percevoir l'impossible.** **Pourquoi la perception est-elle incertaine?**

Vous pouvez vous demander pourquoi je montre cette image¹, un événement important qui vous rappelle qu'il y a une quinzaine d'années, pour la première fois un ordinateur battait un champion du monde d'échec. Le personnage intéressant dans cette image n'est pas Gary Kasparov mais le personnage que vous voyez de dos, qui en fait sert d'intermédiaire entre l'ordinateur et le jeu d'échec.

À cette époque, et toujours maintenant, on est capable de créer des machines qui effectuent des opérations logiques et arithmétiques à une vitesse absolument extraordinaire, qui arrivent à nous battre aux échecs ou à d'autres jeux, mais qui restent encore complètement incapables de se débrouiller dans la vie quotidienne.

En comparaison, vous voyez que ce personnage est très détendu face à Kasparov, qui réfléchit intensément. Il n'a pas grand-chose à faire, percevoir et agir, donc déplacer des objets sur l'échiquier.

¹ Deep Blue bat Garry Kasparov (1997).

C'est une opération que l'on fait tous les jours sans fatigue cognitive apparente. Cela paraît être pour nous une opération très simple par rapport à jouer aux échecs ou faire des calculs.

Je voudrais insister sur l'opposition que l'on peut faire entre les raisonnements logiques et arithmétiques que font les ordinateurs avec une extraordinaire rapidité, performance et précision, et leur incapacité totale à réaliser des opérations qui sont pour nous très simples, très naturelles, que l'on fait sans effort : percevoir un objet, agir dans un monde réel, prévoir le résultat d'une action, etc.

Pourquoi percevoir et agir sont-ils si difficiles pour un ordinateur et si simples pour nous ? Je vais avancer une hypothèse et essayer de la défendre, c'est notre hypothèse : c'est lié à l'incertitude. Les ordinateurs fonctionnent de façon complètement déterministe, ils ont été conçus pour cela, alors que nous vivons dans un monde incertain, et même un phénomène comme la perception, qui paraît si simple, si naturelle, percevoir un objet, c'est être confronté immédiatement à l'incertitude.

☞ **Percevoir un objet, c'est être confronté immédiatement à l'incertitude. La perception résulte d'une forme d'inférence probabiliste.**

Un exemple classique est celui du cube de Necker. Il s'agit d'un objet physique qui a une certaine forme, une certaine texture, qui va être éclairé dans certaines conditions, qui peut être en mouvement. Cet objet va faire naître une image rétinienne par un procédé d'interaction photon/matière extrêmement compliqué, en passant par des dispositifs optiques tel que l'œil, et le cerveau n'a à sa disposition que cette petite information de données sensorielles qui n'est pas la totalité de l'objet, qui ne peut pas tenir compte de tous les phénomènes très complexes d'interaction entre matière et photons, y compris les interactions qui se passent au fond de la rétine de l'observateur.

Le cerveau doit donc résoudre une espèce de problème inverse. Ce problème direct est déjà très compliqué mais il a une solution unique. Le problème inverse consiste, à partir des données sensorielles, à essayer de reconstituer un objet. C'est là où apparaît toute une série d'incertitudes qui vont être la cause de l'existence d'illusions perceptives, de variabilité dans la perception.

Ici, à partir de cette observation sensorielle classique du cube de Necker, il y a deux objets au moins qui peuvent être perçus qui présentent les mêmes qualités de régularité et de symétrie, qui font que ce sont en général ces deux objets que l'on préfère percevoir, mais en réalité on peut aussi percevoir ce dessin, qui est un objet plat. Il y a en fait une infinité de perceptions possibles à partir des impressions sensorielles.

Ce que l'on défend, c'est que la perception résulte d'une forme d'inférence tenant compte de l'incertitude, c'est-à-dire d'une inférence probabiliste. Notre cerveau est conçu pour gérer les incertitudes en permanence, y compris dans les perceptions les plus quotidiennes. Je suis désolé, il y a une formule mathématique dans ma présentation mais elle est très simple à comprendre, et c'est la seule que vous verrez.

On part de deux types de connaissance pour expliquer la perception. D'une part une connaissance a priori sur le monde : il est constitué d'objets ou d'espaces qui ont certaines propriétés de régularité, de symétrie, c'est ce dont Alain Berthoz parlait tout à l'heure. On verra d'autres exemples d'a priori que l'on peut avoir sur les objets ou les mouvements. C'est une connaissance que l'on a avant toute observation et c'est ce que l'on va projeter sur le monde extérieur, sur nos informations sensorielles. D'autre part, une connaissance de la façon dont fonctionnent nos capteurs, nos organes sensoriels, la vision, le toucher. On sait à quel point et dans quelles conditions ces organes sensoriels sont précis ou imprécis. On tient compte de ces deux types de connaissance pour avoir la meilleure connaissance possible *a posteriori*, c'est-à-dire en tenant compte à la fois de ce que l'on sait avant l'observation et de ce que l'observation apporte.

Voilà le cadre théorique général. L'utilisation du théorème de Bayes² et de la théorie des probabilités permet d'essayer de rendre compte d'un certain nombre de phénomènes perceptifs.

👉 Le monde est incertain

Dans le cas de l'action, c'est la même chose, les conséquences d'une action sont tout aussi incertaines. Si je prends l'exemple d'une machine à café, la plupart du temps les machines à café font ce que l'on attend d'elles, c'est-à-dire que vous appuyez sur le bouton café et vous obtenez le café que vous avez choisi, avec éventuellement du sucre et une cuillère, mais il arrive que l'on ait du café sans tasse, une tasse sans café ou uniquement une cuillère, etc. C'est rare mais cela arrive. Pourquoi ?

Le point important est que lorsque l'on parle de probabilité, d'incertitude, on pense à la notion de bruit, c'est-à-dire que l'on aurait un système perceptif ou moteur qui serait bruité. Ce n'est pas cela, c'est vraiment parce que l'on a des informations nécessairement incomplètes. L'image de cette machine à café³, c'est en fait l'image du monde. On ne peut pas tout savoir sur le monde. Ce n'est pas que la machine à café soit bruitée mais c'est parce que vous n'avez pas accès à l'information à l'intérieur. Pour savoir s'il reste encore des gobelets, par exemple, il faudrait avoir la clef et vous ne l'avez pas. Dans le monde, c'est la même chose, on n'a pas toutes les clefs et on ne les aura jamais. C'est pourquoi le monde est incertain.

² (théorème de Bayes) Posterior $P(S | O) = P(S) \cdot P(O | S) / P(O)$

³ Choix d'une action A en fonction d'un résultat attendu R: $P(A | R) = P(A) \cdot P(R | A) / P(R)$

Cette incertitude existe aussi dans la perception de notre orientation dans l'espace et notre perception du mouvement propre. Albert Einstein a montré qu'il y avait une ambiguïté fondamentale entre l'attraction gravitationnelle et les forces inertielles⁴. Nous avons dans l'oreille interne un capteur d'accélération linéaire qui n'est pas capable de séparer la composante gravitationnelle de la composante inertielle. Le problème qu'a le cerveau de notre sujet, c'est qu'il détecte une force globale qui résulte de la combinaison de la pesanteur et ici de la force centrifuge. Ce que le cerveau a à disposition comme connaissance, c'est uniquement la force globale, la résultante des deux. On peut se poser la question : comment fait le cerveau pour, sachant la somme de vecteurs, retrouver chacun d'eux ? A priori, c'est impossible. Il y a une infinité de combinaisons.

☞ Les a priori nous permettent de percevoir l'invisible, ils nous font percevoir des choses impossibles.

Pour résoudre ce genre de problème, notre cerveau utilise des a priori, par exemple le fait qu'a priori notre accélération inertielle est faible en général, et que l'essentiel des forces que l'on subit en permanence résulte de la gravitation.

On a pu montrer que c'était tout à fait plausible en reprenant d'anciennes données sur la perception que l'on a de notre mouvement lorsqu'on tourne autour d'un axe incliné. On peut incliner l'axe un peu ou à 90 degrés, le faire tourner à différentes vitesses, et on demande ensuite aux sujets d'indiquer le type de perception qu'ils ont de leur propre mouvement.

Avec ce modèle, on a un ensemble d'a priori que l'on peut penser raisonnables, notamment un a priori selon lequel l'accélération linéaire inertielle est faible, un a priori selon lequel notre vitesse de déplacement dans l'espace est également faible, a priori qui se révèle physiquement faux, notre terre se déplace à grande vitesse, mais on se perçoit immobile grâce à cet a priori, et on peut reproduire ainsi un certain nombre de résultats d'expériences psychophysiques.

Il y a aussi le fait qu'à certains moments, on observe des distributions bimodales dans la perception qui font que les sujets vont basculer brusquement d'un percept à un autre. Comme dans le cas du cube de Necker il y a plusieurs interprétations possibles, dans le cas du mouvement propre il y a aussi des illusions, des ambiguïtés qui sont inhérentes pas seulement à la vision mais aussi dans des cas de perceptions dynamiques, mécaniques.

Ces a priori nous permettent de percevoir l'invisible, et ici nous avons deux exemples. À partir d'un petit ensemble de points en mouvement, à gauche, vous êtes

⁴ La force totale F agissant sur un corps résulte de l'action combinée de la gravité G et de l'accélération inertielle A . F est mesurée par les capteurs vestibulaires (otolithes). L'état physique (A, G) ne peut pas être « logiquement » inféré à partir de la seule observation otolithique (F), mais il peut l'être de façon probabiliste en ajoutant des connaissances a priori (préférences sur A et G).

capable d'inférer que cette information extrêmement rudimentaire et courte est produite par le mouvement d'un être humain. Vous avez une connaissance a priori sur le type de mouvement, sur le type de dynamique qu'a ce mouvement, qui est très particulier. Avec quelques points seulement on peut reconstituer la marche et même savoir si c'est un homme ou une femme.⁵

L'autre type de percept invisible est celui-là : vous voyez une espèce de tôle ondulée qui oscille, en réalité ce sont simplement des points et si j'arrête le mouvement la tôle ondulée disparaît. Il n'y a pas de forme dans ces points, la forme n'apparaît que s'il y a du mouvement.⁶

Pourquoi perçoit-on une tôle ondulée dans ce cas ? Parce qu'on a un a priori qui nous fait rechercher un objet relativement rigide, qui se déforme le moins possible, et il se trouve que cet objet est une tôle ondulée. Vous percevez un objet qui n'existe pas, qui n'apparaît nulle part, comme une surface transparente qui relierait tous ces points de façon à ce que cette surface soit rigide.

Ce sont aussi ces a priori qui nous font percevoir des choses impossibles, un certain nombre d'objets impossibles ont été décrits. L'objet est impossible mais on peut le percevoir. On le perçoit grâce à nos a priori sur la connaissance de la perspective, la préférence pour la symétrie et la perspective. De même, on peut percevoir la fameuse cascade impossible d'Escher.⁷

Ici, vous voyez un visage qui tourne, imaginez que derrière il y aurait un masque, et vous voyez un nouveau visage qui apparaît en rotation inverse. Vous percevez une forme qui dynamiquement est impossible, un visage qui se transforme en masque puis soudainement redevient un visage.

Là, vous avez un exemple de perception a priori qui l'emporte sur l'information sensorielle.

☪ L'action du sujet modifie les ambiguïtés de perception.

Je vais montrer rapidement quelques autres types d'ambiguïtés auxquelles est confrontée la perception et comment l'action, le mouvement propre du sujet, modifie ce type d'ambiguïtés.

Un exemple classique est l'ambiguïté d'échelle. On est en vision monoculaire et on observe un objet se déplaçant à une certaine vitesse et à une certaine distance. Si vous faites une homothétie par rapport au centre optique de l'œil, un petit objet à vitesse plus faible et à distance plus faible va produire exactement la même impression rétinienne. De mon point de vue, on peut multiplier cette pièce par dix ou la diviser par dix, cela ne changera pas mon information rétinienne.

⁵ Johansson G (1973) Perception and Psychophysics.

⁶ Wallach H & O'Connell DN (1953) J. of Experimental Psychology.

⁷ M.C. Escher, la cascade impossible (1961).

Comment fait-on pour avoir une idée de l'échelle ? C'est un problème qui se pose en réalité virtuelle, on a une difficulté à restituer l'échelle d'un monde virtuel. Cela aide beaucoup d'avoir une vision binoculaire mais également un mouvement propre. Si vous connaissez le déplacement de l'observateur, les deux situations petite distance ou grande distance ont des effets radicalement différents, vous pouvez les interpréter différemment et connaître la distance, l'échelle, à partir de la connaissance de votre propre mouvement.

Nous avons fait une expérience. Dans une situation de réalité virtuelle, on montre un objet qui est simplement constitué de points en mouvement, on simule une distance entre l'objet et le sujet et on demande au sujet d'indiquer la distance, plus d'un mètre, moins d'un mètre, etc. Si on prend les essais de tous les sujets, vous voyez que dans les conditions où l'objet seul est en mouvement, tandis que le sujet reste immobile, les sujets sont capables d'indiquer la distance bien que rien dans le stimulus ne permette de savoir à quelle distance il est.⁸

● Le rôle de l'action dans la perception est fondamentale. Il y a une variabilité des réponses perceptives.

Il n'y a aucune différence entre les stimulations visuelles que l'objet soit proche et lent ou qu'il soit éloigné et se déplace rapidement. C'est extrêmement curieux. Nous nous sommes dit : les sujets arrivent à deviner ce qu'il y a dans l'ordinateur, puisqu'aucune information sensorielle n'est donnée sur la distance. En fait, ils arrivaient à faire cette inférence parce que, le plus souvent, les objets proches se déplacent relativement plus vite que les objets lointains. Les objets lointains ont tendance à être stationnaires.

À partir de cette constatation statistique qui n'est pas consciente, les sujets sont capables de reconnaître que des objets sont proches parce qu'ils se déplacent vite. Evidemment, quand ils connaissent leur propre mouvement, leur capacité d'estimer la distance avec précision est bien meilleure. Il y a une meilleure corrélation entre la distance perçue et la distance réelle.

Il y a également une ambiguïté concave/convexe.⁹ Vous avez vu un exemple avec le masque. On se limite à deux situations : soit c'est l'objet qui bouge, soit c'est le sujet qui bouge. Dans les deux cas, on peut créer exactement la même information visuelle, mais la perception est complètement différente, notamment pour cette ambiguïté concave/convexe en petit champ. Pour les petits objets, il y a une réduction très importante de l'ambiguïté concave/convexe quand c'est le sujet qui crée le mouvement, par rapport à des situations passives où il y a une très grande ambiguïté, les sujets répondent alors pratiquement au hasard que l'objet est concave ou convexe.

⁸ Panerai, Cornilleau-Pérès & Droulez, *Perception & Psychophysics*, 64: 717-731 (2002).

⁹ Dijkstra, Cornilleau-Pérès, Gielen & Droulez, *Vision Research*, 1995.

Un autre exemple de résolution d'ambiguïté entre deux indices en compétition : la perspective et le mouvement.¹⁰

On se sert de la perspective notamment grâce à une hypothèse qui n'est pas toujours vérifiée mais qui l'est souvent, notamment dans le monde artificiel, qui est l'hypothèse de régularité. Le plancher ici est régulier physiquement, mais son image sur la rétine ne l'est pas du tout. Les planches lointaines sont très petites, les autres sont plus grandes du point de vue de ma rétine, mais j'interprète cette différence de taille apparente comme étant l'indice d'une structure 3D.

Vous voyez ici un tableau en trompe-l'œil de Patrick Hughes. Il s'agit d'un objet réel, une peinture faite sur une structure en bois. Vous pensez que cela représente sans doute une pièce, dans laquelle il y a des dessins, des représentations d'art abstrait. Pour vous, c'est sans doute cette partie qui correspond au plancher de cette pièce, et ici le plafond. Il y a des murs avec des arêtes, etc. Vous avez une perception 3D d'un objet qui est en réalité complètement fausse. Si vous faites attention à ce qui se passe aux extrémités du mouvement, cette arête qui semble être à l'arrière est en réalité en avant. C'est un objet créé en perspective complètement inversée.

Si, au lieu de regarder cet objet en mouvement passivement comme vous le faites actuellement, c'est vous qui créez le même mouvement mais cette fois en vous déplaçant, en étant actif, il n'y aurait plus d'illusion, vous verriez la structure 3D de l'objet telle qu'elle est.

☞ La perception ne peut pas être déterministe.

On a reproduit expérimentalement en laboratoire, dans des conditions très simplifiées, cette situation de compétition entre le mouvement et la perspective. Dans la perspective, vous avez une image ici, il y a une infinité d'interprétations, une seule est régulière. Celle-ci donne la même image rétinienne mais elle n'est pas régulière en 3D. En revanche, elle peut correspondre à un vrai objet rigide.

On peut donc mettre en compétition, avec cette idée, les deux hypothèses que fait le cerveau : un, le monde est régulier, deux, le monde est relativement rigide. On peut mettre en compétition artificiellement ces deux priors, et on voit que le prior en faveur de la rigidité est beaucoup plus fort lorsque c'est le sujet qui se déplace. Ceci indique le rapport du poids des deux indices mouvement versus perspective. Ce poids augmente fortement, et est beaucoup plus élevé quand le sujet est en mouvement actif par rapport au cas où il est passif.

Dernier résultat : on demande au sujet d'indiquer quelle est l'orientation d'un objet plan uniquement à partir du mouvement de points répartis aléatoirement sur ce

¹⁰ Wexler, Panerai, Lamouret & Droulez, *Nature*, 409, 85-88 (2001).

plan. On a varié différentes conditions expérimentales, en particulier on a comparé ce qui se passe quand le mouvement est produit par le sujet, donc actif, et quand le mouvement est passif. Vous voyez ici l'orientation réelle du plan et ce qui est perçu.

En condition active, on a une très bonne corrélation. Vous voyez ici la distribution des erreurs de perception. En condition passive, il y a beaucoup plus de dispersion et vous voyez apparaître ici un deuxième pic de la distribution des erreurs qui indique l'ambiguïté, qui est en fait l'ambiguïté que l'on a vue plusieurs fois, celle du cube de Necker, c'est-à-dire que pour un plan donné, on peut voir indifféremment soit le plan réel soit son symétrique.^{11/12}

Ce sont ces données expérimentales, sujet immobile versus sujet actif, que nous avons essayées d'interpréter avec cette idée de combiner des informations a priori et des informations visuelles données par les capteurs. On peut reproduire très exactement ces distributions de perceptions, qui montrent qu'il y a d'abord l'illusion, illusion qui peut disparaître si le sujet est actif. Le rôle de l'action dans la perception est fondamental pour lever un certain nombre d'ambiguïtés, on le retrouve dans le modèle comme dans l'expérience.

Une idée qui est aussi importante : il y a une variabilité des réponses perceptives, variabilité entre les sujets mais également pour un même sujet. D'un jour à l'autre, d'un essai à l'autre, le sujet ne va pas percevoir la même chose. C'est la démonstration que la perception ne peut pas être déterministe.

¹¹ Van Boxtel, Wexler & Droulez, *Journal of Vision* 3(5) : 318-332. (2003).

¹² Colas, Droulez, Wexler & Bessière (2007) *Biological Cybernetics*, 97:461-477.