

AUX FRONTIERES DU TOUCHER

Elena Pasquinelli

PERCeptualRObotics-Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa
Institut Jean Nicod – EHESS ENS CNRS, Paris¹

Introduction

Pour plusieurs raisons, le toucher peut être considéré comme le sens des frontières. Avant tout la peau marque la frontière du corps et du monde. Pour Condillac (1715-1780)², c'est seulement avec l'acquisition du toucher que l'être sensible acquiert la possibilité de distinguer entre soi et non-soi, entre les sensations qui appartiennent au corps et la perception d'un monde extérieur à celui qui en fait l'expérience. Imaginons une statue dont les sens s'ouvrent l'un après l'autre. La vision en premier : la statue qui voit la rose *est* la rose ; puis l'odorat : la statue qui sent la violette *est* la violette. Il en va de même pour l'ouïe et le goût. C'est seulement grâce au toucher – d'après Condillac – que la statue arrive à distinguer entre la sensation de se toucher elle-même et de toucher autre chose ; car lorsqu'elle se touche elle-même elle ne reçoit pas seulement la sensation de la stimulation de la main, mais aussi celle du bras que la main caresse.

La somesthésie est, dans les caractérisations récentes fournies par la psychologie et la physiologie de la perception, une modalité non homogène car elle est constituée par plusieurs composantes, qui sont différentes par la localisation des capteurs et de leurs projections cérébrales, par l'énergie spécifique à laquelle les capteurs répondent, par les caractéristiques de l'objet sur lesquelles elles informent, et enfin par les représentations auxquelles elles donnent lieu. La différence la plus grande est celle entre proprioception ou kinesthésie et extéroception ou toucher proprement dit. Des études récentes³ indiquent que les capteurs profonds, en particulier ceux des muscles, sont responsables non seulement du sens de la posture et du mouvement, mais aussi de la perception du poids, de la dimension, de l'orientation d'un objet qui serait tenu dans la main.

On établit une relation semblable entre proprioception et extéroception dans le cadre des récentes études des interactions avec des "objets virtuels". Les recherches sur les interactions "haptiques" - du grec *aptos*, sentir en touchant – montrent que les caractéristiques géométriques perçues d'un objet peuvent être reproduites à travers des dispositifs qui utilisent les retours de force de l'interaction, donc par des moyens purement "kinesthésiques"⁴.

Le toucher au sens plus stricte, la sensation de la vibration et de la pression cutanée, est pour sa part susceptible de produire des perceptions qui ont été mises en rapport avec la vision, même si certains auteurs refusent d'y voir un substitut effectif de la vision. Il s'agit des résultats des expériences de Bach-y-Rita avec le dispositif dit TVSS⁵ (*Touch Vision Sensory Substitution* : Substitution Sensorielle Visuo-Tactile). Des stimulateurs cutanés sont reliés à une caméra vidéo et à un transducteur du signal lumineux, et ils sont placés à des endroits du corps tels que le front, le

¹ Ce travail a été accompli dans le cadre de recherches doctorales menées à l'Institut Nicod.

² Condillac, E. B. de, *Traité des sensations* [1754], in: *Traité des sensations. Traité des Animaux*, Paris, Fayard, 1984.

³ Etudes sur le toucher dynamique conduites par Turvey et collègues. L'effet de la perception du poids et d'autres caractéristiques de l'objet saisi dans la main, soulevé, bougé, etc. est attribué à la résistance de l'objet à la rotation imprimée par le mouvement du membre supérieur et quantifié en termes des composantes du tenseur de l'inertie correspondant. Voir par exemple: Turvey, M. T. (1996), *Dynamic touch*, *American Psychologist*, 51: 1134-1152.

⁴ Voir, en particulier : Robles-de-la-Torre, G., Hayward, V. (2001), *Force can overcome object geometry in the perception of shape activity through active touch*, *Nature*, vol. 412, 26 July, 445- 448.

⁵ Bach-y-Rita, P., Sampaio, E. (1995), *Substitution sensorielle chez les adultes et les enfants aveugles*, in Y. Christen, M. Doly, M.-T. Droy-Lefaix (eds.), *Vision et adaptation*, 108-116, Amsterdam, Elsevier, 1995.

dos, le ventre. Après un court apprentissage, si les sujets ont la possibilité d'orienter eux-mêmes la caméra, ils reportent la sensation d'objets présents dans l'espace (et non de simples stimulations de la peau), organisés selon une forme de perspective et dont ils perçoivent même les ombres. Ainsi, il est possible de déplacer l'attention de la sensation proximale (sensation cutanée) à celle distale (perception des objets visés par la caméra), et *vice-versa* de retourner de l'objet perçu à la sensation tactile.

Dans ce qui suit nous allons examiner les capacités du toucher par rapport à celles de la vision, mais surtout nous allons montrer les relations qui, d'après la recherche récente, subsistent entre ces deux modalités sensorielles dans des conditions naturelles et aux frontières technologiques.

* * *

La classification des modalités sensorielles : un problème ouvert

La classification des modalités sensorielles n'a presque rien d'escompté, même si le langage et l'intuition distinguent 5 sens principaux. Les critères traditionnels⁶ auxquels se réfèrent les classifications des sens sont essentiellement:

- la propriété à laquelle une modalité sensorielle donne accès (la vision, par exemple est la modalité à travers laquelle on a accès aux couleurs, aux formes, etc.)
- les caractéristiques des expériences subjectives (l'effet que ça fait de voir un objet plutôt que de le sentir au toucher)
- l'intermédiaire de la relation perceptive (par exemple, l'énergie lumineuse pour la vision, mécanique pour le toucher, thermique pour la température)
- l'organe sensoriel spécifique (les yeux avec leurs projections centrales, la peau, les muscles, les articulations et les projections qu'elles ont au niveau central).

Considérés singulièrement, tous ces critères s'avèrent insuffisants à définir et distinguer une modalité sensorielle par rapport aux autres.

Le critère des propriétés par exemple ne prend pas en compte le fait que des propriétés comme la forme peuvent être perçues tant par le toucher que par la vision ; si c'est la même forme qui est perçue au toucher et à la vision (la première étant acquise d'une manière séquentielle et la deuxième de façon simultanée), on identifie toucher et vision, et on obtient *moins* de modalités sensorielles qu'avec la classification traditionnelle.

Le critère de l'organe sensoriel ainsi que celui des énergies spécifiques sont particulièrement problématiques face au toucher : ce que le sens commun appelle toucher se compose en effet de capteurs avec des caractéristiques non homogènes (mécanocapteurs, thermocapteurs, chémio-capteurs) situés à des endroits différents du corps (la peau pour les capteurs superficiels et les muscles, tendons et articulation pour les capteurs profonds), dont les informations remontent les voies ascendantes avec des chemins et des aboutissements partiellement séparés. On se retrouverait ici avec une multiplication des touches, donc avec plus de modalités sensorielles que dans la classification traditionnelle.

Le critère des aspects subjectifs n'est pas non plus déterminant. On appelle des "qualia" les aspects qualitatifs de la propriété perçue. Le risque ici est encore celui de l'inflation des modalités sensorielles: s'il existe un *quale* pour la sensation de vivre dans un grand appartement et un *quale* pour la sensation de vivre dans un petit appartement, avons-nous pour autant des modalités sensorielles correspondant à ces sensations ?

Une solution pour sauver la classification du sens commun est de considérer une modalité sensorielle comme définie par deux critères pris ensemble (comme l'organe sensoriel et la sensation

⁶ Evans, G. (1985), *Molyneux's question*, in *Collected papers*, 364-399, Oxford, Clarendon Press, 1985; Casati, R., Dokic, J., *La philosophie du son*, Nîmes, Editions Jacqueline Chambon, 1994.

subjective ou la croyance associée⁷) ; toutefois, cette solution ne répond pas aux objections représentées par la non-homogénéité du sens du toucher pris comme ensemble de la perception de la position et du mouvement (kinesthésie et proprioception), des sensations vibro-tactiles, des sensations de pression, de la douleur d'origine mécanique et chimique et de la sensation de la température.

Ce que nous avons voulu montrer avec cette courte perspective sur la classification des modalités sensorielles est la difficulté de donner des définitions des modalités sensorielles qui tranchent de façon nette entre, par exemple, vision et toucher, sans considérer les tâches accomplies par les systèmes perceptifs.

Capacités tactiles et capacités visuelles

Le toucher est souvent considéré comme une modalité sensorielle “ pauvre ” par rapport à la vision. La forme, par exemple serait beaucoup mieux saisie par la vision, qui l'appréhende d'une façon simultanée, que par le toucher, où la main extrait des informations séquentielles qui nécessitent une recomposition après coup au niveau central. Cependant, il est clair que nous pouvons reconnaître la forme d'un objet tant au toucher qu'à la vue et que nous pouvons dire que c'est la *même* forme que nous reconnaissons au toucher et à la vue. Le toucher et la vision, pour ainsi dire, *se parlent*. Il s'agirait donc de comprendre quelles sont les propriétés où le toucher arrive à prévaloir sur la vision, et, pour les autres propriétés, quelle est la contribution du toucher à l'activité dominante de la vision. Les choses ne sont pourtant pas aussi simples que cela, car le toucher se compose fonctions aussi bien sensorielles que motrices.

La main comprend en effet deux systèmes : un système sensoriel, qui fournit des informations à propos des objets avec lesquelles elle interagit, et un système moteur qui permet l'échange actif avec les objets et l'environnement. Pour appréhender à travers le toucher, la main doit en effet accomplir des mouvements spécifiques d'exploration. Certaines études sur la spécificité du lien entre propriété de l'objet saisie au toucher et type du mouvement accompli, indiquent que le système moteur accroît les capacités sensorielles de la main⁸. Certains mouvements de la main ont été identifiés, et associés d'une façon robuste et constante avec des propriétés perceptives spécifiques des objets. Par exemple, dans le cas de l'évaluation de la texture d'une surface plusieurs configurations de mouvement pourront être identifiés, mais jamais il ne manquera un mouvement latérale. La pression s'associe par contre à la perception de la dureté et le contact statique à la température; on soutient l'objet pour en évaluer le poids, on explore son contour pour extraire sa forme exacte, on le saisit pour connaître sa forme générale; les deux derniers mouvements s'associent pour appréhender le volume; un test de mobilité des parties est mise en place pour identifier les parties constituantes de l'objet et un test de fonctionnalité pour comprendre son utilisation possible.

La main est donc un instrument intelligent, car elle utilise ses capacités motrices pour améliorer ses performances sensibles. D'autant plus que le système haptique est capable d'identifier des objets complexes qui appartiennent à la vie quotidienne après une très courte exploration⁹.

Dans la reconnaissance des objets le système haptique semble pouvoir compter non seulement sur ses habiletés “ discriminatives ” (celles qui concernent la stimulation des capteurs cutanés de la main qui effleure la surface d'un objet, en suivant ses contours), mais aussi des propriétés des capteurs traditionnellement attribués à la perception du mouvement du corps (proprioception).

⁷ Nelkin (Nelkin, N. (1990), *Categorising the senses, Mind and language*, 5, 149-165) se propose de distinguer les modalités sensorielles par rapport à leur accès épistémologique au monde, c'est-à-dire par rapport au type de croyances auxquelles elles donnent lieu.

⁸ Klatzky, R., S. Lederman, V. Metzger. (1985), Identifying objects by touch: an "expert system." *Perception and Psychophysics*, 37: 299-302; Lederman, S. J., Klatzky, R. L. (1987), Hand movements: a window into haptic object recognition, *Cognitive Psychology* 19: 342-368.

⁹ Klatzky, R. L., Lederman, S. J. (1995), Identifying objects from a haptic glance, *Perception and Psychophysics* 57(8): 1111-1123.

Quand un sujet prend un objet dans sa main, et qu'il le soulève (un exemple de ce qu'on appelle *toucher dynamique* ou kinesthésique ou haptique), la résistance que l'objet oppose à la rotation constitue une information importante sur le poids, l'extension, la forme globale et l'orientation de l'objet par rapport à la main¹⁰. Le système somato-sensoriel est donc capable de reconnaître la forme des objets non seulement de manière séquentielle, mais aussi grâce à des mécanismes de type synchronique, liés aux composantes dynamiques de l'exploration tactile. En d'autres termes, le toucher emploie une variété de mécanismes liés à ses composantes dynamiques qui le rendent capable d'accomplir des tâches de reconnaissance concernant la macro-structure des objets.

Il faut considérer que le toucher possède aussi des capacités spécifiques : c'est-à-dire qu'il existe des tâches perceptives que le système haptique accomplit " mieux " que d'autres sens, en particulier la vision. La perception des textures est peut-être l'exemple le plus représentatif. Katz en 1925 et d'autres auteurs après¹¹ ont soutenu la supériorité du toucher pour évaluer la rugosité, la dureté, la rigidité, la granularité, l'onctuosité, l'élasticité, la température, l'homogénéité de ce qui gît en dessous de la surface d'un objet, etc. C'est la perception de ces différentes propriétés qui compose la perception de la texture, et qui constitue la fonction première du toucher.

Ceci ne veut pas dire que la vision ne participe point à la perception de la texture des objets. Comme la forme, la texture aussi est une propriété multisensorielle. Mais le toucher et la vision utilisent l'information sur la texture de manière différente. Dans des expériences conduites par Lederman, Thorne et Jones¹² il semble que dans l'évaluation de la densité spatiale des éléments d'une surface, la vision domine le toucher, alors que quand la rugosité est en cause c'est le toucher qui l'emporte sur la vision (dans le cas où les deux modalités sont en conflit). La vision utilise donc les aspects spatiaux de la texture, alors que le toucher utilise ceux qui portent sur les propriétés de surface, comme la rugosité.

Echanges et collaboration entre vision et toucher

Il est connu que l'action a un rôle très important dans la perception, au sens où le mouvement permet d'orienter les capteurs perceptifs. On a déjà souligné combien les mouvements d'exploration manuelle sont décisifs et spécifiques à la propriété de l'objet qu'on a l'intention de traiter. Le rôle de l'exploration manuelle ne se borne pas pourtant à l'orientation des organes sensoriels. Imaginons d'effectuer une opération arithmétique suffisamment complexe, par exemple une multiplication à trois chiffres. A moins d'être des sujets particulièrement doués, la mémoire et les capacités d'élaboration interne seules ne nous suffiront pas. Sans même y penser chacun de nous prendra un stylo et du papier et accomplira toutes les actions extérieures nécessaires à donner une réponse satisfaisante à la tâche symbolique. Une action extérieure viendra ainsi simplifier les calculs internes, et donnera, littéralement, un " coup de main " à la cognition – par exemple en lui fournissant une mémoire de travail externe où stocker les résultats des étapes intermédiaires. Imaginons maintenant de jouer avec un puzzle, et d'avoir affaire aux pièces les plus difficiles, celles du milieu, dans une large zone monochromatique indifférenciée. Je prends une pièce d'une certaine forme et de la couleur correspondante, j'approche la pièce que je saisis à la zone à remplir, mais je n'arrive pas à voir si vraiment la forme de la pièce que j'ai choisi correspond de la forme vide qui se dessine face à moi. La reconnaissance visuelle n'est pas suffisante dans ce cas. Je peux continuer à regarder, mais la solution la plus économique en termes de temps et d'élaboration interne sera celle

¹⁰ Voir par exemple: Fitzpatrick, P., Carello, C., Turvey, T. M. (1994), Eigenvalues of the inertia tensor and exteroception by the "muscular sense", *Neuroscience*, 60 (2): 551-568; Pagano, C. C., Carello, C., Turvey, M. T. (1996), Exteroception and exproprioception by dynamic touch are different functions of the inertia tensor, *Perception & psychophysics*, 58 (8): 1191-1202.

¹¹ Katz : *The world of touch*, Hillsdale, New Jersey, Hove and London, Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, 1989; Taylor, M. M., Lederman, S. J., Gibson, R. H., Tactual perception of texture, in Carterette, 251-271, (1973)

¹² Lederman, S. J., Thorne, G., & Jones, B. (1986). Perception of Texture by Vision and Touch: Multidimensionality and Intersensory Integration, *Journal of Experimental Psychology*, 12 (2), 169-180.

d'approcher encore plus la pièce à la forme vide, d'essayer de l'insérer et d'utiliser cette action manuelle pour décider s'il s'agit ou pas de la même forme.

David Kirsh¹³ a conduit des recherches sur les actions manuelles qui aident la reconnaissance visuelle et la cognition dans des tâches non proprement symboliques comme les calculs mathématiques. Il s'est intéressé à un jeu électronique tel que *Tetris*, où les joueurs sont censés réagir vite et prendre des décisions d'ordre perceptif et cognitif. Des formes complexes (zoïdes) tombent l'une après l'autre de la partie supérieure de l'écran : le joueur peut agir sur elles en les tournant et déplaçant avant de les faire tomber sur les zoïdes déjà arrangés, de façon à ne pas laisser des zones vides. Comme dans le jeu du puzzle, il s'agit avant tout de reconnaître la forme du zoïde pour savoir où il peut être situé au mieux. Kirsh a montré à travers ses expériences que la reconnaissance visuelle (le succès dans le jeu) est beaucoup aidée quand le joueur a la possibilité d'accomplir des "actions épistémiques". A l'opposé des actions pragmatiques, qui modifient le monde pour rapprocher l'acteur de son but matériel, les actions épistémiques peuvent même éloigner l'acteur de ce but, comme dans le cas de la manipulation des zoïdes, où apparemment on perd du temps en tournant les objets entre les mains. Cependant, la manipulation a réduit la complexité de la computation mentale, et en effet les décisions de placement sont plus rapides et plus adéquates que si les mains du joueur étaient restées dans ses poches.

Pour que la main et les yeux puissent coopérer à la bonne résolution des tâches, il faut que les deux systèmes dont ils font partie soient reliés de manière privilégiée entre eux. Lors des recherches sur les comportements d'orientation des chats, les neurologues Stein et Meredith ont affirmé que "la collaboration entre les modalités sensorielles est la règle"¹⁴ et ils ont essayé de mettre en évidence des mécanismes possibles d'échange et d'intégration entre vision et somesthésie.

Dans le cortex cérébral les représentations visuelles et somesthésiques occupent des régions anatomiquement séparés et fonctionnellement définies (cartes ségréguées). Une structure cérébrale particulièrement intéressante de ce point de vue est le *colliculus supérieur*, où les cartes qui organisent les représentations visuelles, somesthésiques et auditives (et aussi des projections motrices) présentent un remarquable niveau d'intégration. Dans les cartes visuotopiques (qui codent les positions dans le champ visuel), les stimuli rostro-caudaux se distribuent lelong des méridiens horizontaux (fronto-temporaux), et les stimuli medio-latéraux lelong des méridiens verticaux. Les cartes somatotopiques (qui codent les positions dans le champ tactile) montrent une correspondance régulière avec les cartes visuotopiques : le front de l'animal est représenté rostralement, et ses parties postérieures caudalement ; la surface supérieure est représenté médialement et les aspects inférieurs latéralement. Il a donc une sorte d'alignement géométrique entre les représentations visuelles et tactiles (la même chose vaut aussi pour les cartes auditives et motrices), car les mêmes axes sont utilisés pour les trois modalités sensorielles. Même s'il n'y pas une preuve de l'influence directe des neurones visuels sur ceux somato-sensoriels, l'alignement des cartes indique l'existence d'une interaction intime. Ce constat est renforcé par le fait qu'une grande partie des neurones des cartes visuotopiques et somatotopiques du *colliculus supérieur* est multisensorielle: elle répond à des stimuli visuels ainsi que tactiles (ou auditifs). Les réponses évoquées par des combinaisons de stimuli sont plus fortes par rapport à celles évoquées par un stimulus isolé, mais seulement si les stimuli appartiennent à des modalités différenciées. L'augmentation des réponses est dépendante des caractéristiques des stimuli, telles que la coïncidence dans l'espace (proches au niveau des axes de la représentation, qui sont communs entre les modalités) et l'identité du laps temporel. Il ne s'agit donc pas simplement d'une organisation parallèle entre les cartes, car les informations tactiles et visuelles servent à activer un seul et même neurone. Pour cette raison, les auteurs suggèrent de considérer les cartes sensorielles comme une carte multisensorielle unique et intégrée, plutôt que comme des cartes parallèles et indépendantes. Il existe plusieurs aires du cerveau où de multiples

¹³ Kirsh, D., Maglio, P. (1992), Some epistemic benefits of action: Tetris, a case study, *Proceedings of the 14th annual conference of the Cognitive Sciences Society*, Hillsdale, NJ, LEA, 1992.

¹⁴ Stein, B., Meredith, M., *The merging of the senses*, Cambridge, Mass., The MIT Press, 1993.

afférents multisensoriels convergent, mais le fait que la plupart des neurones du *colliculus supérieur* (niveaux profonds) soit de ce genre, fait de cette structure un cas particulièrement congénial pour l'étude de la construction d'un espace multisensoriel où vision et toucher sont intimement intégrés.

L'intégration de la vision et du toucher : les illusions visuo-tactiles

Les stimuli de l'environnement rejoignent le système perceptif par des voies différentes, visuelles, tactiles, auditives, etc. Les objets perçus, cependant, sont des percepts multisensoriels. Le problème se pose donc de comprendre le passage des stimuli unimodaux aux percepts multimodaux dont se compose notre expérience perceptive quotidienne (en intégrant aussi des aspects qui pourraient dépasser ceux, forcément simplifiés, de la situation expérimentale). De plus, quand deux stimuli rejoignent en même temps le système perceptif, on peut penser que les percepts partiels s'influencent l'un l'autre en se modifiant réciproquement. Les titres que la science a donné aux chapitres du passage du séparé à l'intégré et du simple au complexe sont respectivement '*binding problem*' (problème du liage) et '*bias*' (prévention, médiation). Du reste, quelque chose d'analogue arrive quand la perception d'un stimulus tactile est influencée par un autre stimulus tactile qui l'a précédé : ce phénomène bien connu pour la vision et moins pour le toucher s'appelle *after-effect* (effet consécutif). Une surface plane touchée après une surface courbe convexe tend à apparaître courbe concave, et vice versa¹⁵.

Les illusions ne se produisent pas seulement à l'intérieur d'une même modalité, mais aussi à travers les sens. Ma main gît sur la table, sans que je puisse la voir. Je regarde par contre une main en plastique qui se trouve en face de moi. Quelqu'un donne des petits coups sur ma main et sur la main en plastique, avec un même rythme. Les petits coups sur ma main cessent, tout ce que je vois est qu'ils continuent par rapport à la main artificielle, mais ... je continue cependant à percevoir des attouchements sur ma main¹⁶! Suite à un training de quelques minutes, un phénomène visuel est capable d'induire des sensations tactiles proprioceptives en l'absence du stimulus adéquate. Une expérience analogue a été décrite par le neurophysiologue Ramachandran¹⁷ avec des sujets qui, après avoir subi une amputation, souffrent de ce qu'on appelle "membre fantôme" : la sensation vivante d'avoir encore le membre absent et de pouvoir le bouger. Sauf que, dans un certain nombre de cas (ceux en particulier qui ont été immobilisé avant l'opération), le membre fantôme se bloque dans une sorte de paralysie douloureuse, très difficile à vaincre, vu que le membre, en effet, n'est plus présent. L'idée de Ramachandran était de combattre l'illusion avec l'illusion, en induisant une perception tactile kinesthétique par les voies visuelles, les voies kinesthétiques étant indisponibles. Il a fabriqué une boîte avec deux trous pour l'insertion des mains (main normale et main fantôme, qu'on a seulement l'illusion d'insérer) et un miroir au milieu, de façon à produire la vision de la main absente. En bougeant la main normale le sujet visualise d'un coup sa main amputée comme si elle n'était pas bloquée. Et en même temps il sent sa main fantomatique bouger. Suite à quelques jours d'exercice la paralysie disparaît: l'image visuelle a induit une illusion kinesthétique efficace et durable. Voilà une forme de substitution sensorielle au naturel, sans recours à des dispositifs comme celui de Bach-y-Rita, qui permet de sentir ce qu'on voit, même si le stimulus tactile spécifique est absent.

Il y a aussi le cas où le stimulus tactile n'est pas absent, mais il est simplement associé à un stimulus, par exemple acoustique, discordant. Je touche trois surfaces de la même dureté, mais au

¹⁵ Vogels L. M. L. C., Kappers A. M. L., Koenderink J. J. (2001), Haptic after-effect of successively touched curved surfaces, *Acta Psychologica*, 106, 247-263.

¹⁶ Botvinik, M., Cohen, J. (1988), Rubber hands feel touch that eyes see, *Nature*, 391, 756.

¹⁷ Ramachandran, V. S. (1996), Synaesthesia in phantom limbs induced with mirrors, *Proceedings of the Royal Society London*, 263, 377-386.

contact avec chacune j'entends un bruit différent, qui indique une dureté plus ou moins grande. Une expérience conduite par DiFranco, Beauregard et Srinivasan¹⁸ montre que la sensation tactile des surfaces change par rapport au son qui lui est associé, comme s'il y avait une sorte d'attraction de l'audition sur le toucher. Un tel phénomène indique l'existence d'une médiation (*bias*) de la perception acoustique sur la perception tactile, du moins dans les conditions indiquées. Des expériences diverses suggèrent que le toucher est influencé ou dominé par la vision. En particulier, Rock et Victor ont affirmé que, puisque dans le cas d'un conflit intersensoriel le système perceptif réagit en excluant l'une des deux informations en désaccord, s'il se produit un conflit entre vision et toucher, c'est la vision qui domine, alors que l'information tactile est ignorée¹⁹. Cette idée du "paradigme de la dominance" a été remise en question par d'autres expériences. Il semble en effet que jamais le système perceptif n'ignore les informations disponibles, mais que les perceptions tactiles ont un effet sur celles visuelles, même quand le percept final est plus représentatif des informations gagnées par la vue. Dans le cas de l'évaluation de la texture d'une surface en termes de rugosité, par exemple, le percept final en situation de conflit entre vision et toucher est conforme à une domination tactile, mais la domination n'est pas à 100%. D'après une mesure accomplie par Lederman *et coll.*²⁰, si le toucher contribue à peu près pour 70% à la sensation finale, la vision participe au moins pour 30% à la perception tactile. Il y a donc toujours une influence réciproque des deux modalités, qui fait que la réponse visuelle est modifiée par le stimulus tactile, et *vice versa*. Ce qui implique une contribution bilatérale, même si non paritaire. Il est même possible qu'aucune des deux modalités ne prévaut sur l'autre, mais que plutôt le système crée pour la situation de conflit une solution nouvelle qui coïncide avec une "voie moyenne". Une reprise de l'expérience de Rock et Victor par Heller *et coll.*²¹ a montré que dans l'évaluation de la dimension d'un objet, la dominance d'une modalité (vision ou toucher) sur l'autre se présente seulement quand la tâche est très précise en terme de mesure, alors que dans l'évaluation normale de l'extension le résultat final tient en compte égal l'information visuelle et celle tactile. Même dans le cas où il y a dominance, celle-ci n'est pas toujours dominance de la vision sur le toucher ; le choix d'une modalité dépend du fait que la réponse soit donnée dans l'une ou l'autre modalité. Le système perceptif a donc à sa disposition des stratégies et des solutions multiples pour faire face à des situations de conflit entre les informations tactiles et visuelles. Il peut donner un poids majeur au toucher ou à la vision, ou même prendre en considération une résultante qui ne correspond directement à aucun des deux stimuli. En tout cas les sens participent ensemble au percept final multisensoriel, en modifiant même les percepts partiels unisensoriels, dans une mesure qui dépend de circonstances diverses. Même des circonstances d'ordre cognitif pourraient être pertinentes pour le résultat perceptif. L'expérience passée dans des conditions semblables pourrait influencer sur la "décision" perceptive sur la façon de considérer deux informations en désaccord. Il semble par exemple que la connaissance préalable du poids normal des deux types de balles de golf (l'une, celle pour le training pèse juste 7 grammes, alors que celle de jeu en pèse 45) fait que des joueurs experts de golf perçoivent la balle qu'ils croient plus lourde comme plus légère que l'autre, alors que les deux balles ont été modifiées par l'expérimentateur pour qu'elles soient du même poids²². Un sujet quelconque, sans expertise dans le jeu du golf, n'a par contre aucun problème à évaluer l'identité de poids des

¹⁸ DiFranco D.E., Beauregard G.L., and Srinivasan M.A., The effect of auditory cues on the haptic perception of stiffness in virtual environments, DSC-Vol. 61, *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, 17-22, Ed. G. Rizzoni, ASME, 1997.

¹⁹ Rock, I., Victor, J. (1964), Vision and touch; an experimentally created conflict between the senses, *Science*, 143, 594-596.

²⁰ Lederman, S. J., Thorne, G., & Jones, B. (1986). Perception of Texture by Vision and Touch: Multidimensionality and Intersensory Integration, *Journal of Experimental Psychology*, 12 (2), 169-180.

²¹ Heller, M. A., Calcaterra, J. A., Green, S. L., Brown, L (1999), Intersensory conflict between vision and touch: the response modality dominates when precise, attention-riveting judgements are required, *Perception & psychophysics*, 61 (7): 1384-1398.

²² Ellis, R.R. & Lederman, S.J. (1998). The "golf-ball" illusion: Evidence for top-down processing in weight perception. *Perception*, 27(2), 193-202.

deux balles de l'expérience. Dans la plupart des cas, les illusions perceptives sont imperméables à la cognition : je peux très bien savoir que deux sphères ont un poids identique, il n'empêche que si leurs volumes sont différents, j'aurai tendance à sous-estimer le poids de la sphère plus grande, soit que je la vois et je la manipule, soit que je la soulève seulement. Mais dans certaines circonstances les attentes fondées sur l'expérience sont influentes sur la formation des illusions. Peut-être que d'autres présuppositions d'ordre cognitif contribuent à la résolution de désaccords entre vision et toucher, ou à la mise en rapport entre les modalités sensorielles.

Les frontières technologiques du toucher

Les dernières années ont vu un développement croissant des technologies pour l'interaction avec ce qu'on appelle les "environnements virtuels". À côté des interfaces pour l'interaction visuelle, des dispositifs à retour de force (*force-feedback*) permettent actuellement d'agir sur des objets virtuels ou éloignés (dans des environnements de réalité virtuelle ou de téléopération) et de recevoir en réponse des sensations kinesthésiques. Ces dispositifs haptiques fournissent donc une forme de relation tactile et active avec des scénarios artificiels.

Imaginons d'entrer dans un musée d'arts plastiques, et de nous arrêter devant ce qui nous fait l'effet d'une statue. Imaginons aussi que la statue ne se trouve pas réellement ici, face à nous, mais dans un autre musée à des kilomètres de distance. Celle que nous voyons en ce moment est donc une image de la statue, une image particulière, tridimensionnelle. Comment assigner, dirait Condillac, à la sensation que nous recevons un caractère objectif ou d'extériorité : comment distinguer entre nous-mêmes, nos sensations, et l'objet extérieur qui en serait à l'origine ? La statue est jusqu'ici disponible seulement à la vue. Pour Condillac donc, il n'y a aucun moyen d'opérer une distinction entre ce qui nous appartient et ce qui ne nous appartient pas. Aucun moyen de décider de son objectivité. Supposons à ce point que nous pouvons toucher la statue. Le sens de l'objectivité est finalement ouvert : notre main se lève vers la statue et peut la caresser, explorer ses recoins, ses courbes, apprécier sa résistance, sa dureté. D'un coup, la statue prend vie : elle est quelque chose pour nous avec quoi nous pouvons interagir physiquement. Elle est un objet virtuel mais avec lequel l'interaction visuelle et tactile est réelle et matérielle.

Il ne s'agit pas là seulement d'une expérience de pensée. Le projet du Musée des Pures Formes du laboratoire de robotique perceptive PERCRO à Pise²³ envisage d'insérer un sujet dans une ambiance virtuelle qui lui permet de voir la forme tridimensionnelle de statues de différents musées du monde, et de toucher ces mêmes œuvres d'art grâce à un système à retour de force.

Il est évident que les applications de ce genre de technologie du toucher sont plus vastes que l'interaction avec des statues virtuelles. Elles permettent de toucher ce qu'on n'arrive pas à toucher, parce que à distance, ou n'existant que dans le monde physique. Si ces instruments sont intégrés avec des systèmes de visualisation le problème se pose de la synthèse des informations multisensorielles et de la visualisation de l'action accomplie. L'information devient plus riche et l'interaction plus significative. Les applications diverses de systèmes intégrés de ce genre concernent la performance et l'apprentissage de gestes avec la main, comme par exemple dans la réhabilitation, dans le training d'habiletés complexes, telles les compétences chirurgicales ou l'écriture dans un alphabet inconnu, dans le design et l'élaboration physique de projets. On peut aussi penser de substituer, plus qu'intégrer, la vision au toucher et au mouvement. L'interface haptique que le laboratoire PERCRO a développé pour le projet GRAB²⁴ est censée reproduire un environnement virtuel et une interaction haptique adéquate pour donner aux personnes non voyantes

²³ <http://www.percro.org/projects/pureform.html>

²⁴ <http://www.percro.org/projects/grab.html>

la possibilité de travailler avec les systèmes de Conception Assistée par Ordinateur (CAO), et d'avoir donc accès par le biais du toucher à un domaine typiquement visuel. Dans ce cas il est très important de sélectionner les composantes tactiles qui permettent de reconnaître au mieux les objets, et même des objets particuliers comme les graphiques qu'on utilise pour représenter des fonctions mathématiques, autrement inaccessibles pour des sujets aveugles. Le toucher devient ainsi la modalité d'accès à l'information électronique fournie par des ordinateurs. Si l'on pense à des graphiques reproduits à l'ordinateur, par exemple, il sera nécessaire d'envisager des propriétés tactiles qui permettent de distinguer les différentes lignes, comme la couleur ou la dimension des traits font pour la vision.

De cette manière, les nouveaux dispositifs d'interaction avec les environnements virtuels permettent de créer des nouveaux types d'interaction avec des objets qu'il ne serait pas possible d'atteindre autrement, soit parce qu'ils sont indisponibles, soit en vertu des limitations sensorielles. Certes, le "niveau d'objectivité" des objets virtuels qu'on peut voir et toucher peut encore être amélioré. Il ne s'agit pas en tout cas de reproduire exactement les objets du monde réel tels qu'ils sont dans tous leurs détails (tâche très au-delà des possibilité technologiques actuelles), mais plutôt de comprendre et mettre en œuvre les caractéristiques fondamentales de l'interaction perceptive avec les objets physiques. Nous avons vu par exemple que la vision ou l'audition peuvent modifier la perception tactile d'un objet: toutes ces connaissances peuvent nous conduire vers des interactions virtuelles toujours plus multisensorielles et donc réalistes, et ainsi vers des mondes virtuels toujours plus "objectifs" (dans le sens de la perception de quelque chose comme un objet et non comme un simple stimulus), aussi bien que vers des mondes irréels. En même temps la nouvelle technologie du virtuel peut nous aider à mieux comprendre le fonctionnement perceptif. Le développement des dispositifs haptiques nous permet par exemple d'investiguer d'une façon nouvelle le rôle du toucher dans la construction de l'objectivité. Et non seulement du toucher dans sa composante perceptive, mais plus spécifiquement des composantes motrices et sensorielles de la modalité haptique. Le retour de force permet en effet de respecter la boucle entre action et perception qui caractérise le rapport entre exploration et sensation haptique: des senseurs enregistrent le mouvement du bras ou de la main et les reproduisent dans l'environnement artificiels, à contact avec les objets virtuels, pour restituer la sensation correspondante à la main ou au bras du sujet, celle qu'il aurait perçue dans l'interaction avec un objet physique possédant les mêmes caractéristiques.

Penser et repenser les sens et leurs frontières technologiques signifie donc aussi penser et repenser les objets et les interactions d'une manière qui va au-delà de la reproduction du monde physique, dans ce cas grâce à l'interaction tactile.

* * *

Conclusions

Les illusions multisensorielles nous apprennent que la collaboration entre les modalités sensorielles, et donc entre vision et toucher, est la règle. Même dans le cas où la vision domine le toucher, comme dans le cas des tâches spatiales, le toucher a quand même un rôle dans la formation du percept final, et son importance peut varier par rapport à d'autres circonstances qui regardent le contexte perceptif et éventuellement cognitif, en termes d'attentes, expériences précédentes, allocation de l'attention. Cependant le toucher possède des capacités spécifiques par rapport à la vision : l'état synergique des sens n'empêche pas le toucher d'être le système de référence dans l'exploration des aspects non spatiales des textures, et de se valoir de stratégies multiples pour l'évaluation des propriétés des objets, comme la forme. En particulier, le toucher déploie ses capacités motrices en accord avec ses capacités sensorielles. Ces mêmes capacités motrices sont au

service non seulement de l'orientation des capteurs tactiles, mais aussi de la simplification des tâches de reconnaissance visuelle et de computation cognitive. Le toucher est donc un système expert et intelligent.

Pour cette raison il est particulièrement important de connaître et d'exploiter au maximum les ressources des aspects moteurs et sensitifs du toucher. Le développement des dispositifs haptiques virtuels permet de concevoir des scénarios d'interaction qui suggèrent des applications intéressantes pas seulement au niveau de la suppléance d'autres modalités déficitaires (comme dans le cas des troubles de la vision ou de l'audition). La possibilité d'opérer sur des simulations virtuelles d'objets présents dans le monde naturel par la médiation du sens haptique ouvre des voies nouvelles à l'éducation et l'apprentissage grâce à l'implémentation d'actions pragmatiques et épistémiques qui modifient l'environnement et simplifient les tâches cognitives impliquées. Grâce à des dispositifs haptiques ou à retour de force, il est actuellement possible d'interagir avec des environnements virtuels à travers la modalité haptique, qui, comme nous l'avons déjà souligné, est une modalité éminemment sensorielle et motrice. La possibilité est ouverte aussi de créer, sur la base des règles de l'interaction tactile, des scénarios ou mondes nouveaux, avec la proposition d'expériences sensorielles inédites, comme dans le cas des illusions. La technologie intervient ainsi non seulement dans l'amélioration des conditions de l'interaction et de la transmission de l'information : elle permet de concevoir d'autres perceptions possibles.



Fig. 1 Exemple du fonctionnement du système PURE FORM pour toucher des reproductions synthétiques de statues, du PERCRO SSSA, Pisa (image du site www.percro.org)



Fig. 2 Système pour simulation de conduite de véhicule, avec dispositif haptique à retour de force pour la main et le bras (exosquelette), PERCRO SSSA, Pisa (image inédite)

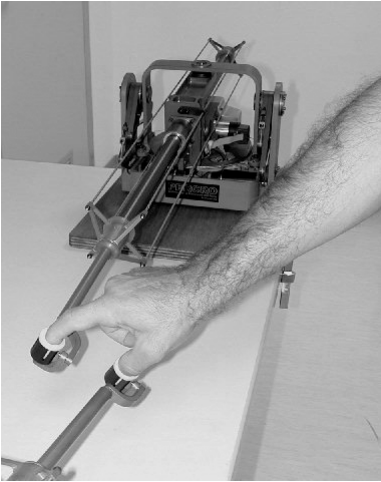


Fig. 3 et 4 Système GRAB pour prise et manipulation digitale avec une ou deux mains, PERCRO SSSA, Pisa (images inédites)