ALAIN BERTHOZ

La notion d'immersion dans les relations du cerveau, du corps et de l'espace

Le problème de l'unité de la perception

Pour nous, physiologistes ou spécialistes de neurosciences, il existe une première approche classique de l'*immersion* qui consiste à étudier la fusion des informations sensorielles. Le problème fondamental est en effet celui de la cohérence, de l'unité du corps propre, qui est à mon avis, une des bases de restitution de la présence. C'est extrêmement compliqué parce que, d'une part nous avons une pluralité de sens qui permettent au cerveau d'élaborer les perceptions. Que nous ayons une perception unique de notre corps tient aussi du miracle et il n'est pas du tout étonnant que, dans un grand nombre de pathologies psychiatriques ou neurologiques, se produise une désorganisation de la capacité à établir des relations entre notre corps et l'espace extérieur, d'où, par exemple, le vertige, etc.

Nous avons des outils pour étudier, par exemple, les interactions entre la perception tactile, la vision et le système vestibulaire. Je vais aborder ici un certain nombre de paradigmes que nous utilisons avec la réalité virtuelle pour analyser cette question. On a maintenant différentes technologies dans certains centres en France, qui sont proches des simulateurs de conduite (nous travaillons avec Renault, par exemple), pour étudier cette fusion des capteurs et la contribution respective de tous les sens à la perception unique du corps.

Nous avons aussi des idées théoriques sur les problèmes de navigation dans les mondes virtuels. Par exemple, si on veut naviguer dans un tunnel virtuel, le problème est que la vision est assez lente ; elle ne nous fournit pas rapidement les informations nécessaires. Or lorsque dans la réalité quotidienne nous tournons dans un tunnel, pour évaluer la rotation, en plus de l'information donnée par la vision, nous disposons d'une autre information sensorielle donnée par le système vestibulaire (les canaux semi-circulaires et les otolithes qui mesurent les accélérations de la tête) et celles que nous donnent les informations tactiles. Le système inertiel vestibulaire et la proprioception sont deux systèmes fondamentaux pour notre orientation dans l'espace. Or quand nous sommes assis devant un monde virtuel sur un écran d'ordinateur, nous ne bougeons pas. Comment remplacer l'information vestibulaire ? Bien sûr, on peut faire comme au Futuroscope de Poitiers : agiter le siège de l'opérateur. Nous avons proposé une autre solution : une information haptique de force donnée à la main par un manche à retour d'effort. Il est donc possible de substituer certaines informations sensorielles à d'autres, pour reconstruire cette cohérence de l'unité corporelle.

Le fait est que cette construction de cohérence, dans des relations avec le monde, est tellement compliquée qu'au cours de l'évolution les organismes vivants ont trouvé des solutions élégantes – que j'appelle « simplexes » – pour résoudre le problème. Le cerveau, par exemple, ne se contente par de regarder le monde : il impose au monde ses grilles d'évaluation. Le cerveau invente des formes qui n'existent pas. Le cerveau modifie aussi les relations spatiales. Celui qui regarde a l'impression que les trois cylindres de la figure (trois cylindres de même taille dans un couloir en perspective) n'ont pas la même taille, mais en réalité ils ont exactement la même taille. C'est notre cerveau qui, dans ce contexte géométrique ou les figures sont placés, leur couloir en perspective, impose ses grilles d'interprétation – ce que j'appelle la tyrannie de la perception. Dans la célèbre expérience des « chambres de Ames », des psychologues de la côte Ouest des USA avaient fabriqué des pièces trapézoïdales (le plafond était penché). Ils avaient remarqué que si on regardait une telle pièce de l'extérieur par un petit trou, on percevait la pièce comme cubique. En effet le cerveau symétrise le monde. Et si on mettait deux petites

filles de la même taille dans ces pièces, le cerveau préférait les percevoir comme ayant des tailles différentes pour maintenir l'illusion d'une pièce cubique.

Une autre solution a été mise au point au cours de l'évolution pour survivre, agir et réagir rapidement : il y a une nette différence entre la perception des formes naturelles et celle des formes artificielles. Les formes naturelles sont traitées dans une structure du cerveau, plus particulièrement du côté visuel, qui s'appelle le *gyrus fusiforme* et qui est tout au fond du cerveau. Cette structure traite les visages, les animaux, etc. Alors que les bâtiments, soit qu'on les perçoive, soit qu'on les imagine, sont traités dans une autre structure qui s'appelle le *para-hippocampe*. La conséquence est que, dans un monde virtuel, on reconnaît beaucoup plus vite une forme naturelle (un animal, etc.) qu'une forme artificielle. Évidemment, cela est utile pour la survie. Cette modularité privilégie les « formes naturelles vraies ». C'est d'ailleurs l'une des difficultés, dans les mondes virtuels immersifs, de donner l'impression de réalité des avatars.

Des chercheurs ont posé la question suivante : lorsque deux personnes regardent ensemble un film ou un scénario virtuel, leur cerveau est-il activé en même temps ? Ils ont obtenu un résultat remarquable. Ils ont enregistré l'activité cérébrale de deux spectateurs portant des casques d'électroencéphalographie pendant qu'ils regardaient un film. Puis, ils ont observé que, par exemple, quand le visage du héros apparaissait sur l'écran, les deux aires fusiformes (spécialisées dans la perception des visages) étaient activées simultanément et en synchronie. Autrement dit, quand deux spectateurs sont présents, il peut se produire une synchronisation entre leur cerveau. La sagesse populaire dit « vibrer à l'unisson ». Ceci peut expliquer certains effets de foule par exemple.

Une autre solution très élégante a été trouvée pour permettre à la fois d'analyser le monde plus rapidement et éventuellement de le partager : elle consiste à spécialiser certaines aires du cerveau, à la fois pour créer un « corps virtuel » dans le cerveau. On sait effectivement maintenant, par toute une série d'études, qu'il y a une zone ici, dans le cortex pariéto-temporal, où est reconstruit le corps propre. Certaines données neurologiques et d'imagerie cérébrale montrent que c'est bien dans cette zone du cerveau que sont constituées la notion du corps propre et la relation avec l'espace. C'est le neurologue canadien Walter Penfield de l'Université McGill qui a identifié chez des patients épileptiques une aire du cerveau impliquée à la fois dans la reconstruction du corps propre et des relations avec l'espace. Nous avons récemment montré que toute cette fonction s'étend aussi au cortex temporal, ce qui est extrêmement intéressant et important pour les neurosciences.

La thèse que j'ai soutenue dans l'ouvrage *La Décision*, et notamment dans le petit chapitre qui s'appelle « Le double » est que, dans notre cerveau, nous avons de nous-mêmes un double, un corps virtuel. Évidemment, depuis toujours, *le double* a inspiré la littérature, depuis Gilgamesh notamment. Nous savons qu'il existe quelques phénomènes perçus chez des patients tels que « l'autoscopie » (on peut apercevoir quelqu'un en face de soi en miroir) et « l'héautoscopie » (on perçoit quelqu'un devant soi) ; ou encore des phénomènes de sortie du corps : par exemple, le sujet est couché dans son lit et, au même moment, il a l'impression qu'il est au plafond en train de se regarder. C'est une dissociation complète.

Nous savons maintenant par des études menées depuis moins de cinq ans, auxquelles nous avons contribué en partie, qu'il existe une zone du cerveau responsable de tous ces problèmes. L'idée que nous avons un double n'est pas neuve. Elle a été proposée il y a longtemps sous la forme de concept de « schéma corporel » et d'« image du corps » en neurologie. Dans les mondes virtuels où sont construits des avatars de soi-même, on peut maintenant visualiser ce double.

La flexibilité du schéma corporel

Le schéma corporel ainsi constitué est extraordinairement flexible, ce qui est tout à fait remarquable. Une très intéressante expérience démontre cette flexibilité : c'est l'expérience de la « main de caoutchouc ». Dans cette expérience, le sujet a posé ses mains sur une table puis, à l'aide d'un écran, on lui cache la main gauche. Ensuite, on met une main de caoutchouc à la place de sa main gauche. Le sujet est donc en face de sa vraie main droite et de sa main de caoutchouc. Il ne voit pas sa main gauche. L'expérimentateur touche en même temps la main gauche derrière l'écran et la main de caoutchouc. En peu de temps, le sujet a l'impression que la main de caoutchouc est sa propre main, il s'approprie la main de caoutchouc par la synchronie temporelle. Autrement dit, il absorbe dans son schéma corporel cette main de caoutchouc.

Ces phénomènes, nous les avons travaillés en laboratoire. Une étudiante, Isadora Olive, avait remarqué que, lorsqu'elle était au cinéma (elle était un peu cinesthésique), quand les gens se touchaient, elle avait l'impression qu'on la touchait elle aussi. Effectivement, une expérience utilisant l'IRM a démontré que lorsqu'un film diffuse l'image de quelqu'un qui se touche la cuisse, les aires somato-sensorielles du cortex cérébral sont activées. On perçoit donc sur son propre corps ce que l'on voit dans un monde virtuel. Merleau-Ponty disait : « La vision est palpation par le regard. »

Nous avons monté au laboratoire une expérience dans laquelle le sujet, avec sa main gauche, actionne un piston. Une caméra située derrière lui enregistre une image de sa main gauche. Dans un casque de réalité virtuelle on lui montre l'image décalée de sa main gauche virtuelle. Cette fois-ci, ce n'est pas une main de caoutchouc, mais bien sa vraie main, ou plutôt l'image de sa vraie main enregistrée par la caméra. La question que l'on se posait était : y a-t-il seulement un déplacement du schéma corporel vers la main virtuelle ou y a-t-il un déplacement de tout le corps ? Jacques Paillard avait montré il y a très longtemps que tous ces problèmes de flexibilité du schéma corporel ont une hiérarchie céphalo-caudale, c'est-à-dire que si l'on adapte la tête, le reste du corps est adapté, mais si l'on adapte le corps, la tête n'est pas adaptée, etc. : toute une problématique extrêmement intéressante.

Dans une autre expérience faite à Lausanne par le neurologue Olaf Blanke, une caméra prenait des images virtuelles d'un sujet vu de dos. Celui-ci voyait, dans son casque de réalité virtuelle, son propre corps vu de dos. Il distinguait donc devant lui un autre lui-même, un double. Il y a eu un transfert extrêmement rapide du corps propre au corps virtuel. Donc, il y a une extraordinaire labilité de notre schéma corporel sur lequel, sans doute, jouent aussi les jeux virtuels et la fiction. Ceci explique aussi pourquoi on peut rapidement prendre un avatar pour soi-même, et se dédoubler.

Les relations entre perception du mouvement et action

Un autre fait concernant la relation entre perception et action peut être important pour l'immersion : *les lois de la production du mouvement contraignent la perception*. Cela veut dire, par exemple, que, si d'un geste je trace une courbe sur une feuille de papier, lorsque vous regarderez cette courbe, vous activerez dans votre cerveau des aires qui vont détecter le mouvement du point sur la courbe ! On peut percevoir le mouvement si la forme est produite par un geste naturel. Par exemple, une calligraphie est produite par un geste naturel ; on a montré par l'imagerie cérébrale que lorsqu'on observe une forme calligraphique, on active l'aire MT située dans le lobe temporal, qui est aussi activée lorsqu'on voit le geste. C'est une des raisons pour lesquelles je dis que les architectes ont oublié ce que j'appelle le « plaisir du mouvement » quand ils nous obligent à vivre dans des univers rectilignes. Autrement dit, percevoir une forme c'est activer dans notre cerveau les mêmes aires que celles du mouvement, si cette forme obéit aux lois du mouvement naturel.

Voyons ce que j'entends par « lois du mouvement naturel ». Lorsque je fais un mouvement elliptique avec mon doigt, mon cerveau le contrôle de façon assez simple grâce à une loi qui s'appelle la « loi de puissance des deux tiers ». Cette loi est valable pour le mouvement et la perception du mouvement. Elle exprime le fait expérimental qu'il y a une relation extraordinairement étroite entre la vitesse tangentielle

et la courbure. En effet, je vais vite si la courbure est faible et lentement si elle est forte. Cette règle est valable pour tous les mouvements naturels que nous faisons, par exemple pour la locomotion : si je décris en marchant une trajectoire elliptique avec mon corps au lieu de le décrire avec mon doigt, cette relation existe aussi. Autrement dit, il y a des principes très généraux qui sont implémentés dans notre cerveau et qui nous permettent de faire ce que l'on a appelé en physiologie « le principe d'équivalence motrice ». Ce principe nous permet de dessiner la lettre « a » avec le doigt, avec la main, avec la bouche (ceux qui sont paralysés peignent avec la bouche) ou en courant sur une plage.

Enfin, nous savons maintenant que notre cerveau utilise des géométries qui ne sont pas euclidiennes. C'est important parce que si on veut percevoir comme naturel le mouvement d'une créature artificielle, il faut que cette créature ait un mouvement qui obéisse aux lois des mouvements naturels. Par exemple, si je vous demande : est-ce que mon doigt décrit une trajectoire en vitesse constante ? Vous ne le percevrez en vitesse constante que s'il n'est pas en vitesse constante. La *loi de la production du mouvement contraint la perception.* Donc, si vous voulez produire des créatures artificielles qui ressemblent aux créatures naturelles, leur mouvement doit être perçu immédiatement comme un vrai mouvement naturel du corps, de quelqu'un de naturel. Actuellement très peu de gens travaillant à développer des créatures artificielles veulent implémenter ces lois qui sont assez simples. Ils passent par la capture de mouvement qui est chère et compliquée. J'ai résumé tout ceci dans mon ouvrage *La Simplexité* (2009).

La relation étroite entre perception et action est un principe général. Par exemple, au cours de l'évolution, s'est développée toute une série de systèmes de résonance entre perception et action, comme, par exemple, le système dit « des neurones miroirs ». Ce système est une grande découverte des neurosciences de ce siècle. On a en même temps confirmé que « percevoir l'action c'est la simuler ». Quelle était la découverte ? Nos collègues de l'équipe de Giacomo Rizzolatti à Parme enregistraient les neurones du singe, dans leur cortex frontal, qui préparent les mouvements, par exemple : manger une cacahuète. Chaque fois que le singe s'apprêtait à manger une cacahuète, on entendait « brup », « brup », « brup » – ce qui était normal pour un neurone que l'on appelle pré-moteur ! Et puis, ayant faim, l'expérimentateur a pris une cacahuète et il a entendu : « brup », « brup », « brup ». Les neurones du cerveau du singe, qui étaient activés quand il prenait une cacahuète, étaient activés quand l'expérimentateur en prenait une à son tour ! Autrement dit, ces neurones n'étaient pas des neurones pré-moteurs, mais les neurones de l'acte. C'est la base de la contagion comportementale, l'imitation, qui est extrêmement précoce. On connaît maintenant les réseaux spécialisés dans le cerveau qui constituent le système miroir. Les mêmes aires du cerveau sont impliquées dans la perception et dans l'action qui est plus que le mouvement, elle est l'acte lui-même.

La multiplicité des espaces

L'espace est très important, mais le problème, c'est qu'il y a une multiplicité d'espaces et là aussi l'évolution nous a dotés d'une propriété tout à fait intéressante. Nous avons dans notre cerveau des modules différents pour traiter différents espaces. Nous avons des réseaux spécialisés qui traitent des espaces proches, d'autres structures et réseaux qui concernent des espaces péri-personnels, d'autres structures encore pour les espaces environnementaux, etc. Par exemple, on a mis des sujets en IRM et on les a fait pointer sur un écran à 70 centimètres et à 2 mètres : ce ne sont pas les mêmes aires du cerveau qui ont été activées. Aussi, changer de référence, ou changer de distance entre l'espace proche et l'espace lointain suppose des basculements d'un système à un autre dans notre cerveau. Au Collège de France, une salle d'immersion virtuelle qui a un très grand écran sphérique nous permet d'étudier tous ces processus.

Nous avons des modules différents pour les espaces proches, moyens, lointains, mais nous avons aussi des modules spécifiques pour traiter des stratégies cognitives différentes. Dans une ville virtuelle, le sujet peut naviguer dans ce que j'appelle une « stratégie de route égocentrée », c'est-à-dire centrée sur

lui-même, « topo-kinesthésique » parce qu'elle implique le corps en acte (je tourne à gauche, je tourne à droite, etc.). Mais, de temps en temps, on peut lui montrer une carte avec une vue globale. Il s'agit d'une « stratégie de survol allocentrique », « topographique », qui permet de trouver un chemin – c'est la base fondamentale de notre capacité à faire de la géométrie. Nous avons travaillé avec l'équipe d'Olivier Houdé sur l'acquisition de deux stratégies chez l'enfant, l'une égocentrée, l'autre allocentrée. Ainsi, nous avons montré que la capacité à utiliser la stratégie allocentrée s'améliore considérablement entre 6 et 10 ans. Pour étudier les différents réseaux du cerveau impliqués dans les stratégies égocentrée et allocentrée, nous disposons aujourd'hui d'une grande variété de paradigmes utilisant la réalité virtuelle. Par exemple, l'un de ces paradigmes concerne l'estimation de la distance dans un palais virtuel. Dans la cour d'un palais virtuel, on dispose trois objets (deux poubelles et une balle). Puis on pose quatre questions : 1) quelle poubelle est tombée ? C'est la question de contrôle ; 2) quelle poubelle est le plus près de vous ? C'est une tâche égocentrée ; 3) quelle poubelle est le plus près de la balle ? ; 4) quelle poubelle est le plus près du plus long côté du palais ? Là on doit changer de référentiel et passer à un référentiel allocentré. C'est un peu comme si je vous demandais si votre écran est parallèle au boulevard Saint-Michel, ou à l'avenue des Champs-Élysées ? À ce moment-là, vous devez changer de référentiel. Il faut passer à une représentation cartographique. L'étude en imagerie cérébrale par IRM a montré que le passage d'un référentiel à l'autre nous fait changer de réseau cérébral. L'immersion suppose que le sujet ait la capacité d'engendrer ce type de changement.

Différences interindividuelles

Les *différences interindividuelles constituent* une question très importante. Chaque individu réagit de manières différentes : certains d'entre nous sont plus cartographiques, d'autres plus visuels. Certains utilisent davantage la partie gauche de leur cerveau[1], d'autres la partie droite, etc. Il existe également des différences entre les sexes, sujet extrêmement important pour ceux qui s'intéressent à la pédagogie. On a élaboré un jeu virtuel pour les hommes et pour les femmes. L'expérience a montré que les femmes utilisent davantage la stratégie égocentrée. Elles préfèrent décrire les itinéraires avec les repères, comme elles préfèrent souvent décrire avec la médiation du langage. Les hommes, en revanche, vont activer l'hippocampe, la structure cartographique. Évidemment, il y a des exceptions[2]. Les cerveaux des hommes et des femmes n'ont pas la même distribution de volumes des aires cérébrales. Les cerveaux sont différents et tout particulièrement les structures qui traitent l'espace. De plus chez les femmes, ces mécanismes sont contrôlés par le cycle menstruel. À différents moments du cycle, les femmes n'ont pas la même performance dans les tâches spatiales. Chez les hommes, ce contrôle est suscité par la testostérone, qui diffère entre le matin et l'après-midi, entre l'été et l'hiver[3].

Maintenant, dans beaucoup de médias, on utilise une navigation qui n'est ni égocentrée, ni allocentrée, mais que j'appelle la navigation « oblique » (« la vue oblique »). En observant cette navigation en IRM, j'ai développé l'hypothèse que cette forme de navigation permet au cerveau de stocker en même temps les deux informations, égocentrée et allocentrée, soit d'utiliser les deux réseaux en même temps, ce qui permet de choisir entre l'un et l'autre.

---

[1]. La latéralisation est le fait est que nous avons un cerveau gauche et un cerveau droit, et que tous les processus ne sont pas traités de la même manière par ces deux parties. Le cerveau gauche est plus impliqué dans les aspects séquentiels, épisodiques (ego-) de la mémoire des trajets et le cerveau droit est plus impliqué dans les aspects globaux (allo-).

[2]. Sur ce sujet, je recommande la lecture de *Sex and Cognition* de DOREEN KIMURA, ou de *Brain Gender* de MELISSA HAINES, OUP USA, 2005.

[3]. L'anxiété constitue un autre facteur très important dans le traitement de l'espace. Nous avons réalisé des travaux qui montrent que les hommes et les femmes, ayant des niveaux différents d'anxiété, n'ont pas les mêmes performances dans la résolution des conflits spatiaux. Souvent, dans les expériences de réalité virtuelle, le fait que le corps est immobile introduit des conflits entre le corps réel et le corps virtuel, entre les systèmes de traitement de l'espace, etc.

Nous avons aussi fait quelques expériences en 3D, car nous ne savons à peu près rien sur les bases neuronales et la question de l'environnement 3D. Nous avons fait quelques expériences avec la station spatiale MIR, avec l'idée d'utiliser la gravité comme référentiel. Nous travaillons actuellement avec EDF sur les centrales nucléaires parce qu'elles sont des univers extrêmement complexes. En fait, EDF utilise la réalité virtuelle pour simuler les pannes et les situations où se posent des problèmes de navigation.

La relation avec autrui

La question de la relation avec autrui représente un enjeu très important, non seulement dans les relations sociales naturelles, mais aussi en raison du développement des avatars dans les mondes virtuels. Le « changement de point de vue » spatial est très important pour toutes les interactions sociales. Dans des dispositifs de réalité virtuelle, nous avons mis au point des manipulations pour étudier les problèmes de changement de point de vue, en introduisant des avatars dans le monde virtuel. Nous étudions avec l'IRM des patients schizophrènes par le biais de « manipulations » assez simples, comme cette capacité de se mettre dans le monde virtuel à la place d'autrui. Mon hypothèse est que la sympathie et l'empathie sont deux choses différentes. D'abord qu'est que la *sympathie* ? Par exemple, si je me mets à rire ou à bâiller, au bout de cinq minutes, 50 % des personnes dans la salle seront en train de faire la même chose. La sympathie consiste à éprouver les émotions d'autrui sans se mettre à sa place ; c'est une contagion des émotions. L'empathie, telle qu'elle était définie par le grand philosophe allemand Robert Vischer est très différente. Elle consiste à se mettre à la place de l'autre, avec un changement de point de vue (de référentiel spatial), en utilisant son corps virtuel, son double, tout en restant soi-même, c'est-à-dire sans forcément éprouver les émotions d'autrui. Avec Bérangère Thirioux[4], nous avons étudié un paradigme proposé par un psychologue, Bavelas. Avec nos collègues Marie-Hélène Tramus et Michel Bret de Paris 8, nous avons construit un funambule artificiel. Nous avons fait une expérimentation où les gens s'approchent du funambule. On ne leur dit rien, on ne les force pas. Nous avons détecté qu'il y a deux types de comportements auxquels correspondent deux types de réseaux neuronaux différents. Dans un cas, les sujets imitent le funambule en miroir, dans d'autres, ils adoptent un comportement en symétrie, comme si réellement ils se « mettaient à la place » du funambule. Nous assimilons le premier comportement à la sympathie et le second à l'empathie. L'enregistrement de l'activité cérébrale par électroencéphalographie montre que des réseaux différents sont activés lors des deux comportements. Selon moi, dans les dispositifs immersifs de réalité virtuelle, nous pouvons adopter vis-à-vis des avatars les deux comportements : rester « extérieurs » et être simplement en sympathie ou bien se « mettre à la place » de l'avatar et percevoir ou agir comme si nous étions à l'intérieur de l'avatar, en voyant le monde de son point de vue, en empathie avec lui.

[4] BERANGERE THIRIOUX est une philosophe qui a travaillé sur l'empathie sous la direction de GERARD JORLAND, historien des sciences.

Bibliographie

BERTHOZ ALAIN, *Le Sens du mouvement*, Odile Jacob, Paris, 1997, 345 p.
BERTHOZ ALAIN, *La Décision*, Paris, Odile Jacob, 2003, 391 p.
BERTHOZ ALAIN, ANDRES CHRISTAN, BARTHELEMY CATHERINE, MASSION JEAN, ROGE BERNADETTE, *L'Autisme, de la recherche à la pratique*, Paris, Odile Jacob, 2005, 482 p.
BERTHOZ ALAIN, RECHT ROLAND (éd.), *Les Espaces de l'homme*, Paris, Odile Jacob, 2005, 394 p.
BERTHOZ ALAIN, JORLAND GERARD, *L'Empathie*, Paris, Odile Jacob, 2005, 308 p.
BERTHOZ ALAIN, PETIT JEAN-LUC, *Phénoménologie et physiologie de l'action*, Paris, Odile Jacob, 2006, 368 p.
BERTHOZ ALAIN, VERCHER JEAN-LOUIS (coord.), *Le Traité de la réalité virtuelle*, Volume I : *L'Homme et l'Environnement virtuel*, Presses de l'École des Mines de Paris, coll. « Sciences Mathématiques et Informatique », 2006, 380 p.
BERTHOZ ALAIN, CHRISTEN YVES, eds, *Neurobiology of "Umwelt". How Living Beings Perceive the World*, Springer, Series "Research and Perspectives in Neurosciences", 2009, XII, 158 p., 22 illustr.
BERTHOZ ALAIN, *La Simplexité*, Paris, Odile Jacob, collection « Science », 2009, 256 p.
ANDRIEU BERNARD, BERTHOZ ALAIN (éd.), *Le Corps en acte. Centenaire de la naissance de Maurice Merleau-Ponty*, Nancy, PUN, « Épistémologie du corps », 2009.