

Le matérialisme et les sciences au 21e siècle. Essai de prospective

Jean-Paul Baquiast

25/03/2014

Plan

Préambule

Chapitre 1 Le matérialisme et les sciences

Chapitre 2. Cadre méthodologique pour une prospective intéressant les sciences et technologies.

Chapitre 3. La physique quantique

Chapitre 4. La cosmologie quantique

Chapitre 5. Les sciences du vivant

Chapitre 6. La robotique

Chapitre 7. Les cerveaux.

Chapitre 8. Le numérique

Chapitre 9. Le spatial

Conclusion

Références

Préambule

Nous pensons pour notre part que les sciences sont matérialistes et que le matérialisme se doit d'être scientifique. C'est pourquoi nous commencerons cet essai de prospective sur les sciences du 21 siècle par quelques considérations sur le matérialisme. Aussi banales qu'elles puissent paraître, il faut les rappeler aujourd'hui.

Certes beaucoup de scientifiques ne sont pas matérialistes. Ils se réfèrent hors de la science à telle ou telle religion. Mais, s'ils sont « professionnels », ils essaieront toujours de faire le départ entre leurs recherches et leurs croyances. Il s'agit de deux mondes qui ne peuvent se mélanger. Si cette barrière n'est pas respectée, on verra, comme c'est malheureusement de plus en plus le cas, s'affronter des « sciences » aux contenus différents et incompatibles; science chrétienne, science islamique, science bouddhiste, etc.

Certains pourront reprocher au matérialisme scientifique de reposer sur une sorte de laïcité qui est vécu comme une variété de croyance religieuse. Peut-être. Disons cependant en ce cas que cette « croyance » préserve la neutralité de la science, afin d'en faire une démarche valant pour tous les hommes, quelles que soient leurs convictions philosophiques, politiques ou religieuses.

Chapitre 1 Le matérialisme et les sciences

Il est de moins en moins facile aujourd'hui de se dire matérialiste. Les matérialistes ne doivent pas hésiter cependant à s'affirmer tels, y compris de façon radicale. Ici notre objectif sera de rechercher toutes les conséquences du postulat matérialiste qui est le nôtre, sans nous laisser arrêter par le souci de ménager les susceptibilités de ceux qui récusent le postulat matérialiste ou, ce qui revient un peu au même, qui récusent la science .

1.1. Le postulat matérialiste

Rappelons que le terme de postulat désigne en sciences un principe non démontré utilisé dans la construction d'une théorie mathématique. Au sens plus général, il s'agit d'une hypothèse ou supposition très forte, très vraisemblable, autour de laquelle l'on essaiera de proposer des expériences susceptibles de le contredire (principe de falsification, pour reprendre les termes de Popper . C'est la même démarche qui fonde les sciences dites expérimentales, sur lesquelles s'appuie le matérialisme..

Le postulat matérialiste repose sur l'idée que l'univers tout entier, y compris l'homme et son esprit, relève d'une évolution spontanée de ses constituants physiques, énergie et matière, sans intervention d'une puissance divine, quelle que puisse être la forme prêtée à cette dernière. Il s'oppose au spiritualisme, qui postule le contraire. Pour le spiritualiste, au-delà ou en deçà de l'univers matériel existe une puissance spirituelle qui est responsable de l'apparition et de l'organisation de la matière, de la vie et de la pensée. Dans les sciences, le matérialiste se refuse à expliquer par l'intervention divine les phénomènes qu'il n'est pas encore capable d'élucider. Au contraire, le spiritualiste, sans pouvoir non plus le démontrer, croit déceler partout le rôle fondateur ou organisateur du divin.

On dit aussi que le matérialisme est moniste. Le monisme est une conception métaphysique qui affirme que le monde est composé d'une seule substance, que cette substance se trouve en toutes choses et qu'elle est toutes choses. Pour le monisme matérialiste, cette substance est la matière. La définition de la matière a varié au cours des âges mais l'objet de la science matérialiste est d'en préciser le contenu en fonction de l'évolution des connaissances. Le spiritualisme au contraire est dualiste. Pour le dualisme, le monde est constitué non d'une substance, mais de deux. Le dualisme spiritualiste (car il existe plusieurs sortes de dualisme dans la tradition philosophique) distingue deux substances, la matière et l'esprit, ce dernier n'étant pas réductible à la matière, mais étant – pour les spiritualistes religieux – lié au divin.

Le matérialisme scientifique, en application du postulat matérialiste et afin de vérifier sa pertinence, s'efforce de faire apparaître les causes physiques permettant d'expliquer les phénomènes, y compris les phénomènes spirituels. Chaque fois que possible, il en extrait des lois qui de proche en proche s'organisent en un vaste

ensemble de connaissances. Ces lois sont constamment remises en question et adaptées pour tenir compte des nouvelles expériences observationnelles. Nous verrons que ces lois, dans la conception relativiste de la connaissance qui est la nôtre, ne sont pas censées décrire un réel existant en dehors de l'homme. Ce ne sont que des constructions réalisées à partir de l'interaction entre les cerveaux humains, les instruments et un « réel » dont la vraie nature demeure inconnue. Mais elles présentent, pour les scientifiques et ceux qui croient à la valeur de la science, l'immense intérêt du fait qu'à chaque instant elles sont le produit d'un consensus entre la vaste communauté des chercheurs.

Il en résulte que le matérialisme scientifique ne se satisfait pas des explications faisant appel au surnaturel, même si celles-ci sont acceptées par de nombreuses personnes. Ces explications refusent le passage par les instruments, qui sont la partie pivot du trio « cerveaux- instruments- réel supposé ». évoqué ci-dessus. Autrement dit, elles ne sont pas vérifiables par l'expérimentation scientifique, objective et reproductible, qui fonde la connaissance scientifique. Mais le matérialisme n'est pas borné. Que ceux qui croient à l'effet moteur du surnaturel en apportent des preuves matérielles que chacun puisse reproduire. Le scientifique matérialiste acceptera de les examiner.

Refuser le recours au surnaturel signifie refuser de recourir au divin comme facteur explicatif des origines ou des fins. Ce processus de refus, entrepris à partir du siècle des Lumières en Europe, a été un grand succès puisque aujourd'hui, la plus grande partie des phénomènes qui étaient présentés par les religions comme des mystères à accepter sans discussion ont été analysés et rationalisés. Mais la science avance et les frontières de la connaissance, tout en s'éloignant, découvrent sans arrêt de nouvelles zones d'ignorance. Les spiritualistes ne désarment pas. Ils ne tardent pas à occuper ces espaces pour y réimplanter le divin. Le matérialisme scientifique, de son côté, ne baisse pas les bras. Constamment, les scientifiques travaillent pour essayer de comprendre ce qui leur échappe encore. Quand ils ne le peuvent pas, ils réservent le sujet à des recherches ultérieures, pour eux ou leurs successeurs. Ils n'adoptent pas la solution de facilité consistant à abandonner le terrain aux spiritualistes.

1.2. Faux procès

Dans la vie courante, le matérialiste a toujours été présenté par ses ennemis comme un jouisseur sans idéal. Pourtant le matérialisme est une posture qui demande un certain courage puisqu'elle oblige à refuser toutes les réconforts que la prière, les textes sacrés ou les cérémonies rituelles mettent à la disposition du croyant quand il est confronté aux difficultés de l'existence, à la mort de ses proches et à la sienne propre. Le matérialiste n'est donc pas cynique ou nihiliste. Il refuse de s'intéresser exclusivement à sa propre personne ou à ses seules relations. Il tente de se projeter au niveau de l'humanité entière, dont il essaye de prendre en considération les intérêts. S'il est scientifique, son idéal est de contribuer aux développements de la connaissance universelle. Certes, il peut rechercher ce faisant des récompenses sociales, celles notamment de la renommée académique. Mais ces dernières, au

moment de la mort, ne comptent plus guère et l'on juge les vrais matérialistes à leur stoïcisme en cet instant suprême.

On reproche aussi au matérialiste de désenchanter le monde, en s'interdisant les ouvertures sur les mythes et en imposant un regard terre-à-terre. Mais nous pensons qu'il n'en est rien. Le matérialisme conçoit le monde comme un espace ouvert à tous les possibles, dès lors qu'ils restent dans les limites de la science, limites qui ne cessent de s'étendre au fur et à mesure que celle-ci progresse, sous l'impulsion de l'imagination créatrice. Les religions au contraire tendent à ramener l'homme à une conception du monde ancestrale, non susceptible de changer, qu'il faut admettre sans pouvoir la discuter.

On dit aussi que le matérialisme est appauvrissant, car il nie le sacré dans lequel, à tous propos, les humains se plaisent à se rassembler. Si on considère le sacré comme une croyance qui fait un lien (religion-religere) entre les hommes et si on considère que ces liens sont souvent utiles à la cohésion et à la survie de la société qui les entretient, le matérialisme n'est pas hostile au sacré. Mais il refuse de se faire dicter par des églises ou par des Etats théologiques la liste de ce qu'il doit considérer comme sacré, c'est-à-dire la liste de ce à quoi il n'a pas le droit de toucher. Pour lui, le sacré n'est pas d'essence divine, mais relève de la construction sociale dont les sciences font partie. Comme elle, le contenu du sacré doit donc évoluer .

Sur un autre plan, celui des méthodes scientifiques, il n'est pas toujours bien vu de se dire matérialiste. On se fait volontiers qualifier de réductionniste, sinon de scientifique. Le réductionnisme est une méthode scientifique consistant à décomposer un objet complexe en éléments plus simples dont on analysera la nature et le rôle, dans l'espoir de comprendre le fonctionnement de l'ensemble. La méthode réductionniste est indispensable, mais elle a l'inconvénient de faire perdre de vue le fait que la combinaison d'éléments simples crée une complexité que l'on ne peut percevoir qu'en se plaçant au niveau de l'ensemble, autrement dit du tout. La prise en considération du tout, qualifiée quelquefois de méthode « holiste », doit être conduite en parallèle avec l'analyse réductionniste. Le scientisme désigne la tendance de certains scientifiques à vouloir appliquer la méthode d'analyse scientifique, y compris sous la forme faisant appel aux mathématiques et aux statistiques, à des problèmes trop complexes pour être résumés en quelques formules. Le scientisme est certes un défaut de l'esprit un peu agaçant. Mais il traduit une foi en la science qui ne peut qu'être encouragée. On peut toujours discuter rationnellement avec un scientifique et le conduire à nuancer des hypothèses ou déductions. Ce n'est pas le cas lorsque l'on affronte un esprit qui refuse systématiquement l'approche scientifique, en arguant de ce que celle-ci n'est pas adaptée au traitement des problèmes rencontrés. Il ne reste plus alors que le recours aux incantations.

Lorsque les ennemis du matérialisme qualifient ce dernier de réductionniste ou de scientifique, ils veulent aussi dire que le matérialiste se refuse à prendre en considération la face invisible des choses, l'esprit, l'âme qui selon eux sont dans la nature et se traduisent par des mythes. La critique n'est évidemment pas davantage

acceptable par le matérialiste. D'une part le matérialisme ne prétend pas réduire toutes les connaissances humaines aux connaissances scientifiques. Un grand nombre de connaissances, y compris dans le monde occidental dit développé, prennent encore une forme intuitive ou empirique, faute d'avoir pu faire l'objet de travaux scientifiques suffisants. Le matérialisme ne nie pas leur intérêt. D'autre part, le thème de l'esprit constitue pour le matérialisme un domaine de recherches et de réflexions. On peut d'ailleurs penser que l'analyse matérialiste interdisciplinaire qui s'attache à analyser ce que désignent ces concepts d'esprit et d'âme, aussi bien d'ailleurs chez l'animal que chez l'homme, va autrement plus loin dans la compréhension du supposé ineffable que celle des spiritualistes. Nous y reviendrons. Il s'agit d'un point fondamental.

Si pour aggraver son cas, le matérialiste se dit convaincu de la nécessité de proclamer haut et fort la vertu de son point de vue, afin de le défendre des attaques permanentes qu'il reçoit des tenants du spiritualisme, alors il est accusé de fanatisme. On l'accuse de vouloir relancer une bataille des idées que certains disent terminée – terminée bien entendu par la défaite des matérialistes survenue quelque part dans le courant du 20^e siècle.

1.3. Le retour en force du dogmatisme religieux

Le retour en force, dans le monde contemporain, y compris dans la culture européenne, d'un spiritualisme agressif ne peut plus être dissimulé ni pris à la légère. Les scientifiques eux-mêmes sont désormais sommés de choisir leur camp par les nouveaux combattants de la foi. On sait où et comment s'exprime ce spiritualisme de combat. Aux Etats-Unis, il s'agit de l'offensive des tenants du Dessein Intelligent ou Intelligent Design (ID). La doctrine du Dessein Intelligent veut prouver que l'évolution biologique a créé des formes trop complexes pour que celles-ci résultent du mécanisme de la sélection naturelle laquelle, globalement, depuis Darwin, permet d'expliquer la diversification des espèces vivantes. Dieu aurait donc été nécessaire pour orienter l'évolution et faire apparaître l'homme et son esprit, reflet de l'esprit divin. L'ID se veut une théorie scientifique à opposer à la théorie adverse, le Darwinisme. Nous reviendrons sur le concept de théorie scientifique dans la suite de cet essai. Les matérialistes considèrent que l'ID n'est pas une théorie scientifique. Elle n'offre aucun argument scientifique sérieux permettant d'en faire une théorie crédible à opposer au darwinisme. Mais les biologistes et paléontologistes américains sont désormais obligés de se battre, y compris devant les tribunaux, pour défendre leur droit à enseigner le darwinisme à l'exclusion de toutes autres doctrines d'inspiration religieuse. Heureusement, ils trouvent le renfort de l'élite de la communauté scientifique mondiale, au premier rang de laquelle il faut placer le grand biologiste évolutionniste britannique Richard Dawkins.

Aux Etats-Unis il n'y a pas que les tenants de l'ID pour combattre le matérialisme scientifique. Sait-on qu'une grande majorité des chrétiens évangélistes sont convaincus que le monde marche à grands pas vers une fin prochaine de type catastrophique (Armageddon) laquelle permettra l'avènement du Christ-Roi

ressuscité et le tri entre les Bons et les Mauvais. C'est leur droit. Mais lorsque, comme certains rapports présentés par des associations de scientifiques le montrent, ils vont jusqu'à tenter d'obliger ces mêmes scientifiques à ne pas parler du dérèglement climatique afin d'empêcher les mesures de prévention des grandes catastrophes naturelles. Comme celles-ci rapprocheraient le croyant de l'apothéose finale, il est pieux de les laisser se produire. Semblable intrusion de la foi dans le domaine politique est inadmissible.

Certes, les grandes religions, n'ont jamais condamné la pratique de la recherche scientifique. Mais elles ont toujours voulu interdire aux chercheurs de traiter de ce qui dans le monde relèvent pour elles du divin, c'est-à-dire des paroles ou écritures des prophètes. *Ne sutor ultra crepidam. Cordonnier, pas plus haut que la chaussure*, selon un propos du peintre Apelle. Or malheureusement pour la science, ces paroles ou écritures prétendument inspirées ont été très bavardes. Elles ont voulu pratiquement tout expliquer. Ceci se justifiait à une époque où la science n'existait pas et où les guides qui se chargeaient de conduire les populations s'efforçaient d'avoir réponse à toutes les interrogations. Mais aujourd'hui, reprendre ces explications bonnes pour des communautés de pasteurs et d'agriculteurs à peine sortis du néolithique représente un véritable crime contre l'esprit.

La situation est encore plus préoccupante dans le monde islamique où sévissent dorénavant des militants de la foi pour qui manifestement celle-ci n'est qu'un argument pour conquérir le pouvoir politique. Mais il s'agit d'un pouvoir politique pervers, au sens où nous l'entendons dans les Etats laïcs, car il se met au service de la religion avec laquelle il se confond. On sait que ces militants de la foi, que ce soit dans les grands pays musulmans ou en Europe, prétendent désormais proscrire les enseignements et recherches scientifiques contraires aux paroles du prophète Mohammed ou aux traditions culturelles de leurs pays. Des imams, en Europe même, interviennent désormais dans les établissements scolaires pour demander que le darwinisme (encore lui) ne soit pas présenté comme une doctrine scientifique. Ils refusent également l'étude de l'anatomie, notamment féminine, ou celle d'un certain nombre d'auteurs jugés sacrilèges. On devine leur souhait profond : que, comme dans les madrasas pakistanaïses, l'étude du Coran remplace les cours de sciences et de philosophie laïque.

Les matérialistes européens pourraient prendre ces menaces à la légère, comme ils l'ont fait jusqu'ici des tentatives pour pénétrer l'Europe déployées par les tenants du Dessin Intelligent à l'américaine. Après tout, la confrontation entre la science occidentale et les irrationalismes multiples qui prolifèrent dans nos sociétés n'est pas nouvelle et n'a jamais gêné ni le matérialisme scientifique ni l'athéisme philosophique. Mais il se produit actuellement un phénomène géopolitique de grande ampleur. Il s'agit de l'expansion des populations et des cultures non-européennes sur les territoires géographiques et culturels de l'Europe. Cette expansion, après tout logique, car aucune civilisation ne peut se vouloir étanche, s'accompagne inévitablement d'un effort de conquête idéologique, dont le combat contre le matérialisme est une composante essentielle. Les Européens doivent le savoir et, sans

exclure évidemment l'étude des religions et des textes dits sacrés, faire ce qu'il faut pour défendre leurs propres traditions intellectuelles, dont le matérialisme scientifique (complété, rappelons-le, de l'exigence d'une égalité absolue entre les femmes et les hommes) a toujours constitué un des piliers.

1.4. Nécessité d'une mise à jour du matérialisme

On nous objectera que beaucoup de matérialistes sont conscients de la menace des spiritualismes militants et n'ont pas attendu notre livre pour réaffirmer la validité de leurs convictions. C'est vrai. Mais nous pensons que dans ce véritable combat, ils ne s'appuient pas suffisamment sur les avancées des sciences, soutenues elles-mêmes par l'indiscutable progrès des techniques, notamment instrumentales (celles auxquelles font appel les instruments scientifiques). En effet, contrairement à ce que disent les détracteurs de ces nouvelles sciences et techniques, toujours prêts à se mobiliser pour défendre la vertu – parfois imaginaire - du passé sans s'intéresser à celle de l'avenir, les théories de la connaissance ont été profondément bouleversées par elles. L'enrichissement corrélatif du tissu social par les technologies de l'information en réseau donne à ce bouleversement une portée démocratique tout à fait essentielle. La philosophie matérialiste devrait s'en trouver considérablement enrichie.

Certes, les connaissances scientifiques récentes, que nous allons présenter et discuter plus en détail dans ce livre, ne pourront pas plus que les précédentes prouver la non-existence de Dieu ni plus généralement le postulat athéiste. Elles ne pourront pas non plus fonder sur des bases indiscutables le postulat matérialiste. Elles ont un tout autre effet. Elles remettent à leur juste place les visions sommaires du monde et de l'esprit développées il y a quelques millénaires par des sociétés humaines à la survie desquelles elles étaient indispensables. Que dans des pays encore extrêmement pauvres ces visions soient toujours nécessaires au maintien d'un minimum de cohésion, cela peut s'envisager et se comprendre. Mais pourquoi ceux qui ont la chance d'avoir accès à l'éducation et à un niveau de vie acceptable - si ce n'est toujours confortable- s'y accrochent-ils comme à des bouées de sauvetage ?

Alors qu'au 19^e siècle et même jusqu'au milieu du 20^e siècle, le matérialisme scientifique n'avait pas beaucoup d'arguments à opposer aux spiritualismes, si aujourd'hui il s'en donnait la peine, il en aurait un grand nombre. Risquons un parallèle : les matérialistes des siècles et décennies précédentes étaient face aux spiritualistes dans la situation de ceux qui pensaient, avant la Renaissance, que la Terre était ronde alors que la plupart la jugeaient plate. Ils ne pouvaient pas réfuter cette affirmation qui semblait inspirée par le bon sens. Aujourd'hui, il suffit de regarder une photo satellite pour renvoyer l'ancienne croyance au magasin des antiquités intellectuelles. S'il se trouvait encore des gens pour affirmer que la Terre est plate et que le Soleil tourne autour d'elle, si ces mêmes gens voulaient nous imposer cette croyance sous prétexte que les Ecritures ont dit qu'il en était ainsi, nous n'aurions aucun effort à faire pour refuser d'entrer dans leur jeu idéologique. Or aujourd'hui, de plus en plus d'intérêts politiques veulent imposer des croyances

contraires aux observations scientifiques, ou veulent interdire que l'on mette en question ces croyances en les soumettant à la critique scientifique.

Mais il ne suffit pas à une théorie scientifique audacieuse ou à une technologie innovante d'être nouvelle pour s'imposer. Si les matérialistes s'appuient sur elles pour argumenter, leurs contradicteurs spiritualistes ne vont-ils pas leur reprocher de tomber, face à ces nouvelles sciences et techniques, dans un scientisme de deuxième type? Ils seraient accusés de se laisser aveugler par les effets de mode et d'accepter les produits d'une science et d'une industrie à la recherche du profit le plus immédiat, en s'interdisant tout recul, toute élévation de la pensée et de la morale. Constamment en effet, les auteurs et les hommes politiques conservateurs, amplement relayés par les médias, reprochent aux nouvelles sciences et technologies, notamment dans le domaine biologique, de favoriser le dérèglement moral et la deshumanisation des rapports humains. D'autres vont plus loin. Il suffit souvent maintenant d'évoquer les travaux de la génétique et de l'embryologie pour se faire traiter d'eugéniste, voire de Dr Mengele. Nous pouvons sans risque d'erreurs faire le pari que cette accusation, proche de la diffamation, sera faite à ce livre, à son auteur et sans doute aussi à son éditeur.

Les matérialistes ne peuvent évidemment pas laisser ce reproche sans réactions. Ils refusent de laisser le monopole de la morale aux religieux. Ils sont les premiers à dénoncer les abus possibles ou réels des nouvelles technologies. Souvent même, ils s'affirment plus moraux et humains que les certains religieux qui, au prétexte de respecter la vie, font des recommandations mortifères aux populations du tiers-monde

Certes, si le matérialisme renforcé que nous proposons conduisait à prendre comme parole d'Évangile tout ce que les vulgarisateurs des nouvelles sciences en disent, il serait en effet bien naïf. Il serait encore plus coupable s'il ne dénonçait pas les risques de certaines technologies militaires détournées par des dictatures ou des terroristes. Nous verrons en effet que les progrès des sciences ne sont pas principalement le résultat d'un effort altruiste de l'humanité pour améliorer la connaissance. Elles découlent en grande partie d'investissements à finalité militaire ou commerciale. Elles doivent donc être critiquées. Mais cela n'a rien de nouveau.

1.5. Les nouvelles sciences et le matérialisme

Nous verrons que ces nouvelles sciences sont capables de renouveler en profondeur la conception matérialiste du monde. Il s'agit d'abord de la physique quantique. On est incapable de dire exactement sur quel type de réel elle se fonde mais ses applications sont multiples, touchant à toutes les autres sciences comme aux outils de la vie quotidienne. Il s'agit aussi des sciences de la vie y compris de la vie artificielle et de la vie synthétique. Il s'agit des infosciences ou sciences de l'information (lesquelles comprennent la robotique intelligente autonome). Il s'agit enfin des sciences cognitives qui, conjuguées aux neurosciences, explorent le cerveau et la pensée

Est-ce à dire que ces nouvelles sciences vont définitivement permettre au matérialisme de s'imposer au spiritualisme? Certainement pas. Plus les sciences progressent, plus elles font apparaître de complexités qui appellent à leur tour de nouvelles recherches. Il s'agit d'un phénomène d'auto-enrichissement qui nous paraît fondamental pour comprendre la façon dont le cosmos se construit. Mais comme ces sciences flirtent en permanence avec le monde quantique dont nous venons de dire qu'il reste mystérieux dans ses profondeurs, comme elles manipulent, à plus grande échelle, des concepts tels ceux de la vie et de la pensée où le flou le dispute encore à l'indéterminé, elles n'ont pas manqué d'induire dans le public beaucoup de spéculations plus métaphysiques et même irrationnelles que scientifiques. Il n'y a là rien d'étonnant.

En tant que matérialistes, nous nous bornerons à témoigner de l'extraordinaire renouvellement des fondations du matérialisme que ces sciences pourraient permettre. Certes, une science en elle-même, et à plus forte raison une technologie, peut servir d'argument indifférencié dans n'importe quel débat philosophique. Par exemple, ce siècle verra se multiplier les robots dits autonomes, c'est-à-dire de plus en plus proches des comportements humains. Les matérialistes y verront une preuve de plus du fait que des systèmes matériels peuvent produire de l'esprit voire de l'âme, ou si l'on préfère des facultés et fonctionnalités analogues à ce que les spiritualistes désignent par ces mots. A l'inverse leurs adversaires spiritualistes se féliciteront de voir l'esprit humain, guidé très vraisemblablement selon eux par une inspiration divine, créer des machines capables de telles performances.

Mais nous pensons que les arguments qu'apporte au matérialisme le développement des nouvelles sciences sont d'une ampleur et d'une pertinence jamais encore rencontrées à ce jour. Leurs perspectives, telles que décrites par les scientifiques concernés ou par des futurologues bien informés, donnent l'impression que se met en place actuellement un monde que les religions, les philosophies, les morales n'avaient absolument pas prévu. Il nécessite pour être compris le recours à des formes de pensée ne faisant plus guère de place aux croyances traditionnelles.

Malheureusement ce monde nouveau reste encore limité à une étroite fraction de l'humanité. Pour qu'il s'étende, un nouveau matérialisme est à créer. Il n'est pas encore possible d'en préciser les détails, mais ses fondations, ses contours et ses principales méthodes de construction commencent à apparaître. C'est ce que ce livre s'efforce de montrer.

Cela ne se fera pas sans résistances, provenant des matérialistes eux-mêmes. Le monde décrit par les nouvelles sciences ne nous sera pas familier. Il nous paraîtra même profondément étranger et, par de nombreux aspects, rebutant. Il ne porte en lui-même aucun message d'espoir. Comme tel, il ne sera pas accepté facilement. Les matérialistes de la vieille école n'y retrouveront pas leurs habitudes séculaires de pensée. Certains seront tentés pour se rassurer d'inventer de nouvelles mythologies d'apparence scientifique qui seront des retours à un spiritualisme n'osant s'avouer. Nous pensons au contraire que pour garder son pouvoir éclairant, le matérialisme

devra s'approfondir et, si l'on peut dire, se radicaliser, en ne refusant pas les débats lui permettant de se faire comprendre, mais en refusant toutes concessions. Celles-ci pourraient en apparence lui permettre d'élargir son audience, mais ce serait au prix, si l'on peut dire, de son âme.

Chapitre 2. Prospective intéressant les sciences et technologies. Cadre méthodologique

Selon l'expression plaisante mais profondément pertinente, il est très difficile de prévoir, surtout si l'on cherche à prévoir l'avenir. L'on ne doit pas s'arrêter à ces difficultés, mais s'efforcer de s'accorder sur un cadre méthodologique concernant la prospective.

2.1. Généralités sur la prospective

Définition de la prospective

La prospective prépare aujourd'hui les esprits à ce que demain pourrait être. Elle ne consiste pas à prévoir l'avenir (ce qui relevait de la divination et relève aujourd'hui de la futurologie) mais à élaborer des scénarios possibles et impossibles sur la base de l'analyse des données disponibles (états des lieux, tendances évolutives, phénomènes d'émergence) et de la prise en compte des processus sociopsychologiques.

Pourquoi faire de la prospective dans le domaine des sciences? On objectera que pour cela, il faut déjà posséder une très bonne connaissance de celles-ci et des technologies dans leur état actuel. Comme cette connaissance, compte-tenu de la complexité du sujet, ne peut qu'être approximative, ne risquerait-on pas de multiplier les erreurs en se projetant dans un avenir où beaucoup d'évènements totalement inattendus pourront se produire. ne fut-ce que dans les prochaines années. Nous répondrons que si l'on refuse tout effort prospectif, l'on renonce à rechercher un sens à la succession des évènements. Même si ce sens se révèle très souvent inexact, ne rien faire serait se laisser disperser entre informations multiples, souvent apparemment contradictoires, qui peuvent susciter une impression d'égarement, voire de panique.

Ceci admis, la prospective doit reposer sur des cas soit réels, soit très probables. Sans exemples concrets de ce que pourraient être les sciences et les technologies dans l'avenir, le citoyen ne s'intéressera pas à leur état actuel. Même si ces exemples se révèlent inappropriés, ils auront au moins servi à concrétiser les discussions pouvant d'ores-et-déjà s'établir à propos de leur portée politique et philosophique, comme en ce qui concerne les conséquences à en prévoir sur le plan institutionnel et législatif. Ainsi, même si les projets d'exploitation à 10 ou 20 ans des ressources minières de la Lune, voire de certains satellites, n'aboutissent pas dans les termes actuellement

évoqués par leurs promoteurs, on peut être persuadé que la démarche se concrétisera inéluctablement assez vite, sauf en cas d'effondrement économique mondial. Il n'est donc pas inutile de réfléchir dès maintenant au cadre juridique dans lequel elle pourrait s'exercer, soit celui d'une concurrence libre voire sauvage, soit celui d'une internationalisation excluant toute appropriation, régime encore en vigueur à ce jour en ce qui concerne l'exploration des terres antarctiques.

En fait s'interroger sur l'avenir constitue un exercice politiquement et socialement indispensable, et d'ailleurs très pratiqué, voire populaire. L'expérience montre que chacun, tel M. Jourdain, fait de la prospective sans le savoir. Face à tout événement nouveau, l'esprit humain, relayé par les médias, ne peut s'empêcher de se projeter dans l'avenir, de tenter des rapprochements, de suggérer des conclusions. Mais il faudrait faire de cette démarche une véritable science développée avec rigueur plutôt qu'abandonnée aux considérations de circonstance. Certes, la prospective doit tenir compte du fait que, le plus souvent, l'avenir qui se déroulera sur un mode dit chaotique par les scientifiques. Ce terme signifie que la multiplicité et l'interaction des facteurs déterminants sont telles que la prévision peut être bouleversée par l'apparition d'un agent totalement imprévu qui bouleverserait les équilibres en cours d'établissement (le célèbre battement d'aile de papillon ...). Dans ce cas, il faut apprendre à reconnaître les nouveaux états du monde en résultant (on parle d'émergence, concept sur lequel nous reviendrons).

Mais la prospective n'est-elle pas contre-productive? Le plus souvent, notamment dans le climat de pessimisme qui aujourd'hui accompagne tout « progrès » scientifique, elle peut provoquer des réactions excessives de défense à l'égard des risques dénoncés. Certaines de celles-ci dégénèrent en peur de l'avenir dont les dégâts politiques et scientifiques sont considérables, aboutissant aux excès du « principe de précaution » faisant l'objet d'innombrables discussions. Mais d'autres réactions se révèlent utiles. Ainsi les prévisions du Club de Rome ont nourri de nombreuses politiques de défense de l'environnement. Bien évidemment, ces réactions de défense suscitent de nouveaux risques que de nouvelles prospectives doivent s'efforcer de faire apparaître.

Sur quelles durées porter l'attention?

A 10 ans, les changements prévisibles seront peu perceptibles, noyés dans la poursuite des contraintes actuelles. Néanmoins, des événements totalement surprenants pourront survenir, comme rappelés ci-dessus. Il faut s'y préparer. A 20 ans, des changements importants ou très importants surviendront nécessairement, sauf catastrophes globales qui doivent elles-mêmes être envisagées. A plus long terme, 50 ou 100 ans, les prévisions seront nécessairement démenties par les événements. Mais, comme il vient d'être indiqué, s'y livrer reste souhaitable, sinon nécessaire. Des changements radicaux seront donc à envisager, sinon prévoir. Au delà, on rentre dans le domaine de la science-fiction. Mais celle-ci, qui comporte le mot science, n'est pas inutile non plus, ne fut-ce que par son effet éducatif. La science-fiction présente une grande utilité, non seulement en termes romanesques proprement

dits, mais pour une meilleure réflexion sur notre avenir. Ceci dit, il s'agit d'un tout autre exercice.

Dans cet essai, nous nous placerons dans une fourchette de 10 à 20 ans selon les domaines, afin de rester le plus crédible possible.

Pourquoi se fixer sur les sciences et les technologies?

Parce que celles-ci sont les facteurs les plus puissants, aujourd'hui, pouvant induire des transformations du monde global qui soient à la fois à échéance rapide et de grande ampleur. Mais leur effet, favorables ou défavorables, ne se feront sentir qu'à travers les transformations qu'elles imposeront aux philosophies, morales collectives et choix politiques hérités du passé et souvent encore très persistants. Ainsi, nul ne discute plus aujourd'hui l'importance des technologies numériques dans l'évolution des organisations sociales, des modes de création et même des contenus de conscience. Cependant, ceux qui raisonnent encore sous l'empire des croyances traditionnelles, notamment dans le dualisme entre l'esprit et la matière, à la base de toutes les religions, continuent à ne pas s'en apercevoir, ou ne pas vouloir s'en apercevoir. La réflexion que nous proposons ici touche aux fondements même du matérialisme (ou naturalisme, en termes anglo-saxons), qui est le choix fondamental des auteurs de ce livre. Renvoyons le lecteur aux pages consacrées ici à cet important sujet.

Une observation s'impose, concernant les domaines scientifiques sur lesquels nous nous proposerons d'attirer l'attention. Ils seraient potentiellement innombrables. Plusieurs encyclopédies ne suffiraient pas à les recenser. Nous avons donc fait un choix guidé essentiellement par l'actualité. Il vaut mieux évoquer des thèmes en discussion que s'égarer dans des supputations sur des disciplines, sans doute très importantes, mais qui ne font pas l'objet de débats approfondis. C'est par exemple le cas de la plupart des sciences humaines et sociales.

Par ailleurs il va de soi que nos considérations seront nécessairement limitées aux points les plus importants. Nous n'essaierons pas non plus d'expliquer au lecteur les tenants et aboutissants de tous les termes employés. Wikipedia, dans sa version française ou mieux encore anglaise, fait cela très bien. De plus, notre site, « automates-intelligents.com » a rassemblé depuis maintenant douze ans, de nombreux articles et références sur les questions scientifiques, comme sur leurs implications politiques et philosophiques.

Dans quel cadre géostratégique?

La recherche scientifique comme le développement des technologies en découlant, représentent des atouts majeurs pour s'imposer comme grande puissance. A cet égard, les Etats-Unis, à la suite d'une convergence de facteurs historiques, sont devenus depuis la fin de la seconde guerre mondiale une puissance scientifique dominante tous azimuts. L'objectif initialement fixé d'avoir 5 années d'avance sur le reste du

monde a été atteint. C'est généralement encore le cas, malgré certaines économies imposées par la crise économique mondiale. Il faut noter que ce sont depuis les origines (la bombe atomique) des recherches scientifiques dans le domaine militaire qui ont été et demeurent la locomotive tirant l'ensemble. A celles-ci on peut ajouter les recherches dans le domaine spatial, considéré lui aussi comme un domaine stratégique à ne laisser à aucune autre puissance (full spatial dominance).

L'agent incontournable de cette politique est depuis quelques décennies la Darpa (*Defense Advanced Research Projects Agency*) créée en 1957 au sein du Département de la Défense (DOD) pour reprendre le leadership momentanément acquis par l'URSS dans le domaine spatial avec le lancement du spoutnik. Depuis, la Darpa, avec un budget annuel d'environ 3,5 milliards de dollars d'aujourd'hui sans compter des financements non divulgués provenant du DOD, a réussi à faire travailler pour elle l'élite de la science internationale. Elle a été à l'origine de toutes les grandes réalisations technologiques ayant façonné nos sociétés. Avec une grande clairvoyance, contrairement à l'URSS, l'Agence a réussi à les adapter au domaine civil, où elles ont été reprises et diversifiées par des investisseurs industriels. Les plus connues sont l'Internet et le GPS, mais il ne s'agit là que du sommet d'un iceberg. Dans tous les programmes intéressant le spatial, la Darpa a collaboré avec la Nasa, tant au plan militaire que civil. La Nasa dispose aujourd'hui d'un budget de 4 milliards de dollars, proche de celui de la Darpa.

On notera que ces 2 budgets sont sans doute inférieurs à ceux consacrés par l'Europe à la recherche et au développement. Mais ils sont concentrés dans une démarche régaliennne unique avec une volonté d'aboutir. Ce n'est pas le cas en Europe.

Aujourd'hui, cependant, les Etats-Unis se pose la question de savoir s'ils ne vont pas être, dans quelques années sinon rapidement, dépassés par la Chine, en qui Washington voit un adversaire, dans le domaine militaire mais aussi civil. Comme le montre la presse américaine, cette question préoccupe régulièrement les Etats-Unis. Elle intéresse aussi les Européens. Si une compétition avec la Chine s'ajoute à la compétition avec l'Amérique, le retard européen global, déjà très marqué, ne va-t-il pas augmenter encore.

Les Américains se voient engagés dans une course à la puissance avec les nations asiatiques, dans le monde en général et dans le Pacifique en particulier. Or manifestement, après les retards russes qui se sont accumulés, c'est la Chine qui est devenue le grand rival. Ceci non seulement sur le plan militaire, mais en ce qui concerne l'avenir, c'est-à-dire les grands programmes scientifiques. Dans l'espace, par exemple, partie de presque rien, la Chine fait dorénavant un parcours sans faute, visant tous les domaines jusqu'ici réservés à la Nasa et à l'Esa: station orbitale, satellites, débarquement sur la Lune puis sur Mars.

Si l'on en croit ses statistiques, elle est désormais le pays qui compte le plus de chercheurs au monde, devant l'Europe et les Etats Unis. Les statistiques chinoises évoquent 1,600 million de chercheurs, en 2008. Certes, ces données sont difficiles à interpréter, à supposer qu'elles soient exactes. Quelle est la qualification des chercheurs qu'elles désignent? L'exemple du classement de Shanghai des universités,

qui met la France à un niveau sans doute trop bas, le montre. De plus, les chercheurs en sciences humaines, aussi utiles soient-ils, ne peuvent se comparer avec ceux dédiés aux sciences dures et à la biologie. Ceci dit, la Chine ambitionne de devenir la première au monde en recherche-développement et elle met en priorité de ses objectifs, dans un premier temps, le facteur humain. D'où un effort au moins quantitatif bien supérieur non seulement à celui des USA mais à celui de l'Europe. Cela lui donnera dans les prochaines années, une force de frappe sans égale.

Le rapport de force dépendra évidemment de ce que pourra ou voudra faire le reste du monde. Pour les USA, l'enjeu de rester les premiers, nous l'avons rappelé, est présenté – et généralement admis – comme vital. L'Europe en général et la France en particulier, semblent indifférentes – y compris en acceptant de la part des "alliés américains" un espionnage scientifique devenu systématique. La Russie et les autres pays du BRICS, hors la Chine, ne sont plus encore, ou pas encore, dans la course. Mais ils essaieront, contrairement à l'Europe, d'améliorer leurs performances.

En termes de puissance de calcul, on cite souvent le fait que la Chine dispose de l'ordinateur le plus puissant du monde : le Tianhe-2. Mais le parc américain disponible est d'une richesse et d'une diversité sans égales, dans les domaines civils et bien évidemment militaires. De plus la puissance informatique n'est pas tout, mais aussi la capacité de travailler en réseau, sur des données recueillies à très grande échelle. A cet égard on a découvert récemment que les USA avaient accumulé, par divers procédés, des données en masse (big data) dans la plupart des domaines de la Recherche Développement, leur conférant un avantage considérable, que n'ont pas les Chinois. Ils ne les partagent pas, contrairement à ce qui se faisait traditionnellement dans le champ de la recherche scientifique.

La Chine n'a pas cette capacité de recueillir des données en masse. Par contre elle n'hésite pas à s'informer, y compris par un espionnage humain, "humint", mais aussi de plus en plus technologique. Les États-Unis rangent cette démarche dans le champ devenu prioritaire pour eux de la cyber-war.

Concernant l'Europe, les dépenses consacrées aux budgets de recherche et aux universités ne croissent plus d'une année sur l'autre, et ceci depuis des décennies. Par contre, selon l'OECE, les dépenses de la Chine évaluées en terme de Recherche et Développement ont cru de 1995 à 2006 de 18% par an. Le désintérêt de l'Europe, peu évoqué par les médias, signe évidemment une quasi volonté de suicide dans tous les domaines. Les dépenses de R/D chinoises marquent au contraire une forte volonté politique, partagée par les quelques 300 millions de chinois influents. D'où un rythme accéléré de croissance de l'enseignement supérieur et de la recherche. Sur 20 ans sinon avant, ils y arriveront sans doute. Ceci il est vrai (mais qu'importe à leur yeux) se paye par le maintien dans le sous-développement de quelques 500 millions de chinois ruraux et suburbains.

Le nombre des étudiants chinois, passé en quelque 10 ans, de 5 millions à 25 millions, comme celui des établissements d'enseignement supérieur, estimé à 1700, joue un rôle important. Mais ces chiffres ne sont pas les seuls à considérer. Il faut y

inclure les jeunes chercheurs impliqués dans les grands programmes publics, dont le plus emblématique est comme rappelé ci-dessus la course à l'espace, les programmes d'infrastructures (notamment dans les technologies de communication et le rail) et surtout les budgets militaires qui ne sont étudiés ici que par de rares spécialistes.

On a beaucoup évoqué aussi ces dernières années le rôle de la diaspora scientifique chinoise, présente massivement aux Etats-Unis, mais aussi de plus en plus dans l'Extrême-Orient russe. Pékin est partagé entre la volonté de faciliter son retour en Chine et son désir d'en maintenir de très bons éléments à l'étranger. Ceci non seulement pour des raisons de prestige, mais pour faciliter ce que nous appétons avec la réserve diplomatique nécessaire l'acquisition de connaissances.

On a estimé que 40% des chercheurs américains sont chinois ou apparentés. Beaucoup d'entre eux semble-t-il seraient prêts à retourner en Chine si des conditions favorables leur étaient offertes. Ceci mettrait momentanément à mal une partie de la science américaine, notamment celle localisé sur la côte W. En France, les universitaires avertis diront que la plupart des stagiaires chinois passent essentiellement leur temps à s'initier aux recherches en cours, sans rien apporter de précis. Ce qui n'est pas le cas aux USA.

La première réaction des pays occidentaux, en Amérique comme en Europe, devrait être de lancer, crise ou pas, de nouveaux investissements dans les grands programmes, universitaires mais aussi industriels. Nul n'ignore que tandis que la Chine est en train de gagner la course à la Lune puis à Mars, l'Europe vient seulement de positionner son 4e satellite de géolocalisation Galiléo, alors qu'il en faut au moins 8 pour faire de la localisation satellitaire avec une précision suffisante.

En Chine, dans les média, le thème le plus répandu consiste à glorifier les avancées du pays, y compris en biologie et en médecine. En Europe les média et derrière eux les politiques n'ont qu'un thème favori, le "*science bashing*". Et cela marche bien, car le public est incapable de prévoir l'appauvrissement intellectuel qui menace le continent.

Aujourd'hui, par exemple, les décideurs politiques français semblent ignorer les enjeux de l'ordinateur quantique, dont on parle ces jours-ci. Sur une telle base d'ignorance et de naïveté, comment espérer soutenir des coopérations scientifiques avec la Chine, qui n'intéresseraient que des collectivités locales à la recherche d'un peu d'activité.

Quant aux programmes cadres de Bruxelles, ce sont des modèles d'inefficacité du fait d'une gestion trop peu démocratique, des lobbying excessifs, de la rivalité permanente entre Etats-membres et répétons-le, de l'espionnage américain.

2.2. L'arrière plan socio-politique prévisible pour les prochaines décennies.

Il s'agit d'un domaine de prospective indispensable à l'étude des orientations que prendront les sciences et les technologies durant les périodes considérées. Ces dernières dépendent en grande partie de l'état des sociétés dans lesquelles elles se développent.

Concernant les sciences elles-mêmes, on retiendra qu'elles sont devenues – et resteront – selon un terme généralement admis, convergentes et en croissance accélérée. Le terme de convergent signifie que tout progrès (progrès au sens d'approfondissement des connaissances) se manifestant dans l'une se répercute sur toutes les autres. Ainsi les progrès de la biologie se répercutent sur la robotique, et réciproquement. Le terme de croissance accélérée provient d'une constatation depuis 50 ans en ce qui concerne l'informatique, d'où découle la loi dite de Moore. Tous les deux ans, ou cinq ans, les potentialités doublent, quels que soient les domaines.

Il en résulte que certains prospectivistes, tel l'américain Ray Kurzweil, ont créé le concept de Singularité. On peut lire à ce sujet les publications du Singularity Institute (voir <http://singularityu.org/>). La convergence et l'accélération se poursuivant sans obstacles conduiront à un état aujourd'hui indescriptible, où tout, pour le meilleur comme pour le pire, pourrait devenir possible. Il s'agit d'une image, mais il faut la retenir.

Parmi ces possibilités, on ne doit pas exclure celle d'une transformation de l'espèce humaine, ou si l'on préfère de l'homme. Transformation, là encore, pour le meilleur ou pour le pire. On parlera alors de post-humain ou de transhumain. Nous reviendrons in fine sur ces perspectives, en introduisant notre propre concept de « complexe anthropotechnique ».

Mais quel type d'avenir prévoir à ce jour? Un avenir serein ou un avenir menaçant, voire générateur de catastrophes? Comme rappelé ci-dessus, les sciences et les technologies ne sont pas suspendues dans le vide au dessus des sociétés, mais fortement conditionnées par l'état de celles-ci.

Un avenir serein

Dans cette perspective, les conflits actuels entre humains s'atténueraient, notamment du fait de l'augmentation des possibilités due au progrès scientifique et technique. La Singularité évoquée plus haut produirait un tel développement des ressources et une telle maturation des mentalités que les différentes crises de rareté et leurs conséquences socio-politiques pourraient rapidement disparaître. Il y a quelques années, les futurologues pariaient en général sur un tel avenir. Aujourd'hui, seuls quelques optimistes convaincus continuent à en défendre l'idée. Domaine par domaine, nous mentionnerons ci-dessous les conséquences tant bénéfiques que malheureuses pouvant résulter du progrès des connaissances et des pratiques

scientifiques.

Un avenir menaçant, voire catastrophique

Il s'agit de ce que prévoient désormais un grand nombre de prospectivistes. Ils s'y préparent de plus en plus. Ainsi vient d'être créé à Cambridge un [Centre for the Study of Existential Risks](#). L'un de ses promoteurs, l'astrophysicien Martin Rees, avait d'ailleurs publié en 2003 un livre prémonitoire « Our final hours » que rien ne permet aujourd'hui de vraiment contredire. Dans cette perspective, certains observateurs, imprégnés de culture biblique, disent en termes imagés que 4 nouveaux Cavaliers de l'Apocalypse ravagent dorénavant la Terre. Ce terme désigne des fléaux dont on peut constater tous les jours les effets destructeurs.

* La prise de possession du monde par un capitalisme spéculatif privilégiant le profit individuel et l'extrême court-terme. On parle en anglais d'un « *global junk bonds fund* » ou fonds spéculatif mondial « pourri ». Ce capitalisme n'est pas seulement limité aux pays dits capitalistes. On le retrouve dans tous les pays émergents, notamment l'Inde ou la Chine, même s'il se dissimule sous d'autres appellations. Il est parfois assimilé au capitalisme financier ou néo-capitalisme, nécessairement transnational, car rien ne limite plus désormais en pratique les mouvements de capitaux, notamment lorsqu'ils se réfugient pour échapper aux réglementations nationales dans les paradis fiscaux. Mais ce capitalisme n'est pas seulement financier. Il exploite les ressources vitales pour l'humanité: terres et produits agricoles, matières premières, produits énergétiques. Il ne les exploite pas en « bon père de famille », selon la vieille expression, mais en spéculant, soit en bourse soit par des mesures de contrainte politique, lui permettant d'en tirer des bénéfices immédiats, sans se préoccuper de leur conservation. La recherche scientifique fondamentale, comme indiqué ci-dessous, n'en profite pas.

* Les dislocations économiques en résultant, multipliant les inégalités. En découle le concept de 1%/99%, autrement dit 1% d'humains de plus en plus riches, 99% d'humains de plus en plus pauvres. Ce concept avait été lancé par les manifestants américains du mouvement dit « Occupy Wall Street ». Il ne fait que constater ce que mesurent les études en profondeur concernant l'effet à long terme des « progrès technologiques ». Même si ceux-ci se traduisent par des améliorations incontestables bénéficiant à toute l'humanité, comme en matière de téléphone portable ou plus largement de santé, ces améliorations continueront à bénéficier proportionnellement plus aux riches et super-riches qu'aux pauvres. Il y a tout lieu de craindre que ce phénomène soit renforcé par le développement des nouvelles sciences et technologies. Par exemple, seule une très petite minorité d'humains pourront tirer profit des possibilités offertes par l'« homme augmenté » dont nous reparlerons, vu leur coût et l'accroissement concomitant de la population.

De plus en plus, ces inégalités apparaîtront au grand jour, du fait de l'extension de la

société de la communication. Elles susciteront inévitablement des révoltes, et, en retour, des réactions de protection, policières voire militaires.

* La faillite des Etats et de leurs valeurs de protection collective. De tels Etats protecteurs, dits aussi Etats-providence, étaient très peu nombreux. Ils n'intéressaient en fait que l'Europe, avec quelques extensions aux Etats-Unis. Ils découlaient d'une conception du service public, illustré par le programme établi à la fin de la 2e guerre mondiale par le Conseil National de la Résistance en France. Dans le cadre d'une conception généreuse des droits de l'homme, les ressources devaient être partagées entre les riches et les pauvres. Les services publics collectifs financés par des impôts sur la consommation et la fortune concrétisaient ce partage.

Aujourd'hui les riches et super-riches mentionnés ci-dessus ont acquis suffisamment de pouvoir pour obliger à remettre en cause ce partage. y compris dans les pays européens. Il en résulte que les services publics, sous prétexte d'économies, sont de plus en plus amoindris, au profit des opérations spéculatives. En ce qui concerne les sciences et technologies, ceci est particulièrement dangereux. On constate une quasi disparition des recherches fondamentales, non génératrices de profits immédiats. Les technologies elles-mêmes sont financées au regard des bénéfices commerciaux qu'elles peuvent générer ou, dans une perspective tout aussi réductrice, dans la mesure où elles renforcent les capacités de sécurité-défense des Etats et des particuliers.

Si les Etats relativement riches jusqu'ici, comme les Etats européens, sont menacés de faillite, la plupart des autres Etats du monde, sans structures et sans moyens, et déjà qualifiés d'Etats faillis, risquent de le rester indéfiniment. D'autres Etats, situés dans les marges intermédiaires, comme la Grèce en Europe, paraissent en train de s'effondrer.

*Les idéologies radicales, qui poussent les hommes à s'entretuer pour raisons de guerre sainte. Le terme de guerre sainte (dhihad), désigne particulièrement les sociétés islamiques. Il est indéniable aujourd'hui que celles-ci sont de plus en plus prises en mains par des forces politiques qui, sous couvert de religion, s'efforcent d'accroître leur domination dans les parties du monde où elles sont déjà présentes. Elles semblent engagés dans un processus inquiétant de conquête. Malraux avait dit: « *Le 21e siècle sera religieux ou ne sera pas* ». Il faudrait peut-être transposer cette phrase au profit de l'islamisme radical. Mais l'islamisme n'est pas seul en cause. Toutes les religions, notamment monothéistes, cherchent actuellement à s'étendre, tel nous l'avons dit le christianisme dit évangélique.

Ces diverses religions ignorent la science ou la déforment à leur profit, quand elles ne la combattent pas. Il s'agit aujourd'hui de la plus grande des menaces pesant sur l'esprit des Lumières, né en Europe et y ayant prospéré.

* Ces Cavaliers de l'Apocalypse vont sévir sur une Terre de plus en plus dévastée par

les conséquences de changements de température dont les intérêts dominants persisteront à refuser d'admettre la gravité. Ceci jusqu'à ce que des paliers irréversibles (tipping points) soient atteints: hausse du niveau des mers de 10cm à plus d'1m, sécheresses de plus en plus étendues, épisodes climatiques extrêmes, disparition de nombreuses espèces terrestres et océaniques, apparition de nouvelles épidémies... Se développeront en conséquences des migrations massives et des guerres de survie, alors que les populations les plus pauvres n'auront pas eu le temps nécessaire pour atteindre la « transition démographique » (équilibre entre morts naturelles et naissances).

Malgré les promesses quelques peu oniriques de certains scientifiques croyant pouvoir prévenir ou compenser le réchauffement par de grands travaux d'ingénierie globale, rien de tel ne se fera, ne fut-ce que pour des raisons économiques. Certaines tentatives seront sans doute entreprises, mais sans études suffisantes sur leurs effets à long terme.

Par ailleurs, dans le même temps, les principaux investissements dans la recherche scientifique et les technologies continueront à bénéficier soit à la défense proprement dit, soit au pilotage des comportements et de la pensée. Le reste de l'humanité n'en profite qu'à la marge. Google peut aujourd'hui être considéré comme l'archétype des grandes entreprises qui utilisent le développement de l'internet pour mettre en place un « cerveau global » à visées non seulement commerciales mais de contrôle totalitaire (voir ci-dessous). Bien que les chiffres restent confidentiels, on peut estimer que 80% des investissements techno-scientifiques sont réalisés aujourd'hui dans ces deux grands domaines. Cela ne diminuera pas, au contraire.

Ceci dit, quelque soit l'avenir qui se prépare, serein ou menaçant, on peut prévoir que les perspectives de développement des sciences et des technologies ne seront pas sensiblement affectées, et que la vitesse de ce développement restera à peu près constante, sinon en accélération. S'exercent en effet des contraintes globales, tant technico-économiques que sur les esprits des humains participant à la croissance scientifique. Elles jouent en profondeur, à l'image de la tectonique des plaques.

Le visage noir de la science

La réflexion proposée ici ne doit pas faire abstraction des critiques de plus en plus nombreuses que suscite, non le processus anthropologique de la démarche scientifique en lui-même, mais les conditions dans lesquelles la science est produite, comme certains des résultats qu'elle obtient. Il ne s'agit pas de faire écho à ce que l'on pourrait appeler un populisme anti-scientifique, très répandu dans tous les milieux sociaux victime de ce que l'on appelle le progrès. Ce populisme est généralement incité ou attisé par des intérêts politiques visant à recruter des électeurs, par exemple au nom de l'écologie, ou à faire ressurgir des convictions religieuses en voie de disparition. Par contre, les matérialistes, qu'ils soient ou non des professionnels de la science, ne seraient pas crédibles s'ils refusaient d'évoquer

des dérives qui ont toujours fait de la science l'arme des pouvoirs et des puissants leur permettant de s'imposer aux sociétés.

La plupart de ces dérives ont depuis plusieurs années voire décennies été régulièrement dénoncées, y compris par des scientifiques eux-mêmes. Nous avons cité le livre de l'astrophysicien et « astronome royal » britannique (sir) Martin Rees « Our final hours ». Ses prévisions pessimistes, voire catastrophistes, n'ont jamais été considérées comme excessives, y compris par les scientifiques. Beaucoup d'entre eux ont constitué des clubs ou groupes de pensée pour inciter à l'éveil des esprits et des consciences. C'est le cas de l'organisation Scientists for Global Responsibility (<http://www.sgr.org.uk/t>) qui regroupe des chercheurs travaillant pour la défense britannique, qui mettent en garde contre les risques découlant de certaines recherches dans le domaine militaire, ou des utilisations qui en sont faites.

Ceci dit, aussi utiles que soient les dénonciations ou même les combats contre les sciences et technologies issues du militaire et transposées dans le domaine civil, ou contre les effets destructeurs des applications scientifiques civiles, en matière par exemple de réchauffement climatique et bouleversement des écosystèmes; il faudrait éviter, dans une démarche comme celle proposée ici, de s'y enfermer. Le risque serait grand de reprendre sans originalité une forme de pensée anti-scientifique déjà trop répandue, notamment en France. Bien plus utile serait un effort original pour faire apparaître, dans l'évolution actuelle des sciences et des techniques, les aspects potentiellement dangereux, voire simplement contestables, qui n'auraient pas jusqu'ici été vus clairement par l'opinion, y compris par certains chercheurs directement impliqués.

Nous pourrions citer en exemple ce qui a été nommé la « crise du technologisme », autrement dit le fait qu'à partir d'un certain niveau de complexité, une technologie se révèle dépassée et dangereuse parce que sa complexité est devenue non maîtrisable. Un exemple peu connu en France d'une telle situation est offert par l'avion de combat américain F35 dit Joint Strike Fighter, développé depuis plus de 15 ans par le Pentagone et l'industriel Lockheed Martin, qui n'a pas encore abouti et qui sera peut-être abandonné. L'accumulation des sous-ensembles technologiques dont l'on a voulu pourvoir cet appareil a fait que, non seulement les délais et les coûts ne cessent de s'élever, mais que l'avion ne volera sans doute jamais, sauf sous des formats réduits, car il est devenu impilotable et inapte à la maintenance. Une telle situation, comme dans la plupart des cas analogues, tient non seulement à l'incompétence des décideurs politiques et à la servilité des industriels, au sein de ce que l'on nomme à juste titre les lobbies militaro-industriels, mais aussi au fait que les scientifiques impliqués n'avaient pas eux-mêmes pris conscience des problèmes posés par la maîtrise de la complexité.

Cet exemple, comme un très grand nombre d'autres faciles à trouver, montre la nécessité d'une critique politique des programmes scientifiques et techniques, critique provenant de ceux-mêmes qui contribuent directement à les conseiller et les mettre en oeuvre. La chose n'est pas facile, elle est même souvent héroïque, car elle peut aboutir à scier la branche sur laquelle on repose. Mais elle sera de plus en plus

nécessaire. Nous en donnons ici de nombreux exemples concernant le développement de l'internet et de la société numérique. Refuser en bloc les évolutions en cours serait non seulement impossible mais dangereux, conduisant à jeter le bébé avec l'eau du bain. Les accepter les yeux fermés n'est pas pour autant recommandable. Une grande partie des professionnels du domaine commencent à s'en rendre compte.

Chapitre 3. La physique quantique

Il n'est pas courant de mettre la physique quantique, encore souvent désignée par son ancien nom de mécanique quantique, au premier rang des domaines à prendre en compte dans une prospective sur l'avenir des sciences. Cela tient en général à l'ignorance où se trouve l'opinion des innombrables applications de cette physique dans pratiquement toutes les autres sciences. Cela tient aussi à son caractère considéré par beaucoup comme ésotérique. Non seulement elle utilise au plan mathématique, un « formalisme » encore quasiment incompréhensible mais dès son origine elle a créé des concepts loin du sens commun. Ces concepts ont été vivement discutés, mais rarement convenablement interprétés. Pour notre compte, nous pensons pouvoir prévoir sans risques qu'elle jouera un rôle déterminant dans la compréhension et la transformation du monde terrestre, tant au 21^e siècle qu'au delà.

Aujourd'hui encore, malheureusement, peu de gens comprennent véritablement ce qu'est le monde quantique. Et encore, comme l'avait dit le physicien Feynmann, ceux qui disent qu'ils l'ont compris montrent qu'ils ne l'ont pas compris. Il reste que les applications technologiques de la physique quantique sont partout, que ce soit dans les laboratoires ou dans les objets de la vie quotidienne. On peut pronostiquer sans grand risque que la physique quantique poursuivra la marche triomphale entreprise dès les années 1930. Sans se substituer à la physique ordinaire, qui en deviendra un sous-ensemble, elle imposera de plus en plus ses solutions et aussi ses explications du monde à l'ensemble des sciences.

Le sujet reste si ésotérique qu'il convient de rappeler, malgré les innombrables publications existantes, les quelques généralités par lesquelles la physique quantique se distingue de la physique ordinaire, dite macroscopique. En ce qui concerne les applications actuelles et futures de la physique quantique, nous nous limiterons à évoquer quelques domaines particulièrement probables. Mais, même en ces domaines, l'évolution sera si rapide et possiblement si inattendue que le lecteur devra prendre ces considérations avec beaucoup de prudence.

Nous aborderons un dernier point au terme de cette brève présentation, celui des apports de la physique quantique à la cosmologie. La question paraîtra trop théorique pour retenir l'intérêt. En fait nous la considérons comme fondamentale parce qu'elle permet de jeter un regard constructif sur les grandes questions qui ont toujours

préoccupé tant les spiritualiste que les matérialistes: l'origine de l'univers, son évolution, l'émergence de la vie et de la pensée, le concept d'infini...et bien d'autres. A toute ces questions ou la cosmologie rejoint la métaphysique, la physique quantique permet d'apporter des réponses de type matérialiste et non spiritualiste. Ces réponses ne seront jamais définitives, comme en ce qui concerne toutes les démarches scientifiques, mais elles se préciseront de plus en plus dans les prochaines années. Il paraîtrait dans ces conditions tout à fait pertinent d'utiliser le terme de cosmologie quantique pour les regrouper.

3.1. Généralités sur le monde quantique

On découvre désormais que les particules quantiques dites q.bits (voir ci-dessous) ont toujours joué un rôle décisif dans les phénomènes biologiques essentiels, comme la fonction chlorophyllienne, les perceptions sensorielles ou le sens de l'orientation chez de nombreux animaux. Les spécialistes du cerveau commencent à supposer qu'elles interviennent dans le fonctionnement du cerveau, c'est-à-dire dans la production de la pensée chez l'homme. Dans un très proche avenir, l'ordinateur quantique commencera à devenir opérationnel. Compte-tenu de ses capacités de calcul, les pays qui en disposeront prendront un avantage décisif sur les autres. Google et la NSA américaine (National Security Agency) ne s'y sont pas trompés et cherchent actuellement à en développer des versions utilisables pour la gestion des grandes masses de données (big data) et la pénétration au sein des programmes cryptés.

A une toute autre échelle, la physique quantique intervient dans la cosmologie, c'est-à-dire l'étude scientifique du cosmos. Les cosmologistes se sont aperçus qu'elle était indispensable pour commencer à expliquer des phénomènes encore peu connus, le big bang ou les trous noirs. Elle ne remet pas en cause tous les acquis de la cosmologie einsteinienne, notamment la gravité, mais elle participera, en liaison avec celle-ci, à l'élaboration de ce qui sera peut-être une théorie englobante, dite théorie de la gravitation quantique. Les applications pratiques de ces recherches sont encore lointaines, mais leur portée philosophique est considérable. Elles permettent de commencer à donner un sens scientifique à des concepts dont les mythes et religions continuent à se réserver le monopole: la création, l'infini, un monde extraterrestre se situant au dessus du temps et de l'espace, par exemple.

Il est donc très important comme nous l'avons écrit plus haut, de mettre la physique quantique en tête de la liste des sciences et techniques qui détermineront l'évolution du 21^e siècle. Nous ne pourrions pas cependant ici reprendre des extraits des très nombreuses études qui lui ont été consacrées. La place manquerait. Bornons-nous à signaler une bonne présentation récente de la question, due à un praticien et un théoricien de la mécanique quantique, le français Frank Laloë. La version française de l'ouvrage vient d'être publiée par les Editions du CNRS: Comprendons-nous vraiment la mécanique quantique ? Le livre, sauf quelques passages, est aisément accessible aux non-spécialistes.

Pour bien situer cependant les domaines dans lesquels se situeront les principaux enjeux des 30 prochaines années, il n'est pas inutile de rappeler brièvement le cadre expérimental dans lequel se sont placés et se placent encore ses développements. Ceux-ci paraissent si bizarres au sens commun (*spooky*, avait dit Einstein) que leurs implications philosophiques sont souvent refusées;

Avec la physique quantique, les particules, notamment les photons, électrons et protons (quarks), paraissant constituer la matière et l'énergie ont perdu leur image traditionnelle de particules. Il a fallu pour les décrire de nouveaux outils et de nouvelles méthodes. Ceci a retenti nécessairement sur la cosmologie, puisque l'univers est constitué, entre autres, d'atomes et de particules et qu'il faut donc tenir compte de la façon dont ces entités se comportent, notamment dans les états limites décrits par la relativité générale. Mais c'est dans la façon dont nous considérons le monde macroscopique et le monde microscopique que la physique quantique a principalement changé notre façon de penser. Elle est la mieux à même de représenter, pour le philosophe des sciences et plus généralement pour toute personne informée, l'essentiel de la révolution apportée par la physique moderne dans nos représentations du monde. Cette révolution est née d'expériences, telles celle dite des « fentes de Young », incompréhensibles dans le cadre de la science macroscopique, qui ont imposé un renouveau complet des façons de se représenter le monde. Bien que ceci figure dans tous les manuels, revenons sur ce sur ce que nous ont appris ces célèbres fentes

Les fentes de Young

Sur un écran comportant deux fentes, envoyons un flux de particules, par exemple des photons. Ceux-ci peuvent être manipulés aujourd'hui soit en groupe soit un par un, ce qui permet a priori de les considérer sans ambiguïté comme des particules classiques. Or nous constatons que les photons ne sont pas répartis, sur un mur situé derrière l'écran, en deux amas égaux correspondant à ce qui se serait passé si ces photons avaient été de vraies particules analogues à des grains de plomb. Ils sont répartis le long de franges d'interférence analogues à celles que l'on constate lorsque, dans une étendue d'eau, une onde heurte une digue percée de deux fentes et la traverse. L'onde initiale est brisée en plusieurs ondes dont la combinaison des points hauts et des points bas reconstitue l'analogie de franges d'interférence, avec des intervalles d'eau agitée et d'eau calme.

Nous sommes obligés d'en déduire que nos photons, bien qu'ils aient été émis sous la forme de particules, étaient en même temps de caractère ondulatoire et se sont comportés comme des ondes. Chaque photon individuel a traversé l'écran en passant simultanément par les deux fentes, comme le ferait une onde – d'où le terme de mécanique ondulatoire donnée à la nouvelle science par Louis de Broglie. Il n'est pas possible de reconstituer sa trajectoire puisqu'il a emprunté simultanément les deux fentes.

Mais les photons ne sont pas seulement des ondes. Si en effet, on dispose derrière l'un des fentes de l'écran un dispositif capable d'absorber la partie de l'onde-photon passant par cette fente, on retrouve derrière l'autre fente une particule classique qui n'est plus capable de construire des franges d'interférences avec d'autres photons. Le photon s'est transformé en véritable analogue d'un plomb de chasse. Il est donc redevenu une particule « classique » dont on peut reconstituer la trajectoire.

Plutôt que nier la pertinence de l'expérience des fentes de Young, les premiers physiciens quantiques ont décidé de franchir le pas et de reconnaître le caractère spécifique des particules subatomiques, ce qui les rendait incompatibles avec les règles de la physique macroscopique. Dans cette dernière, une particule (un grain de plomb, pour reprendre notre exemple) peut être complètement observé et donc localisée à partir de sa position et de sa vitesse de déplacement, dite aussi impulsion. Une particule quantique au contraire, qui est à la fois une particule et une onde, ne peut pas être observée en conjuguant ces deux paramètres. On peut connaître sa position **ou** son impulsion, mais non les deux simultanément. Si l'on veut cumuler les deux observations, comme on cherche à le faire dans l'expérience des fentes de Young en mettant derrière une des fentes un instrument du type « compteur de photons » (par exemple un miroir qui renvoie le photon à un détecteur de lumière) lequel précisera que le photon est passé par cette fente et non par l'autre, on détruit son caractère quantique ondulatoire et on le transforme en particule ordinaire. L'observation n'est donc pas neutre. D'une certaine façon elle construit l'entité observée.

Les propriétés désormais incontournables de la particule quantique

Comment alors décrire une particule quantique ? Assez simplement (en principe) par une équation dite fonction d'onde ou vecteur d'état qui donne la probabilité de trouver la particule dans telle position et avec telle impulsion à un moment donné. La fonction d'onde traduit une des principales propriétés de la particule quantique qui est l'état de **superposition**. Elle se trouve simultanément dans un nombre infini d'états superposés intermédiaires entre une position et une impulsion bien définies. Pour la physique macroscopique, cela n'est pas gênant. Comme les instruments de celle-ci ne manipulent généralement pas les particules une à une, mais par grands nombres, les probabilités de trouver les particules dans une position et avec une impulsion données deviennent très grandes. Il est donc possible de travailler avec un nombre suffisant de particules pour leur faire accomplir des tâches précises, comme celle consistant à s'harmoniser au sein d'un rayon laser.

Les instruments du monde macroscopique n'utilisent pas encore de particules quantiques individuelles, très difficiles à produire et à maintenir sans interférences avec le monde macroscopique. Ils utilisent des particules traditionnelles traitées en masses par la chimie et la physique macroscopique : millions ou milliards d'électrons, photons, neutrons, capables de se combiner de façon stable sous la forme de ces atomes et molécules constituant notre monde, sans changer d'état à tout moment. Dans ces instruments, les particules sont représentées par des

approximations probabilistes ou statistiques qui se révèlent tout à fait suffisantes au fonctionnement des ordinateurs, lasers, grands accélérateurs et microscopes électroniques.

Outre la superposition et l'**indétermination** qu'elle entraîne, le progrès des instruments modernes, notamment les interféromètres, ont révélé d'autres propriétés étranges des particules quantiques (que beaucoup d'auteurs préfèrent qualifier de micro-états). La première est la **non-localité**. Si nous enfermons une particule quantique isolée dans une boîte (opération qui n'est pas facile mais aujourd'hui faisable), nous ne pouvons pas dire où se trouve cette particule. Nous sommes dans la position du pêcheur face à un étang suffisamment sombre pour qu'il ne puisse apercevoir le poisson qui s'y trouve. Il ne peut donc pas décrire ni sa position ni la vitesse avec laquelle il se déplace. Pour lui, le poisson est partout... tant du moins qu'il ne l'a pas pêché. Mais alors, s'il le sort de l'eau, il peut dire où est le poisson mais il le fait disparaître en tant que « poisson-dans-l'étang » avec ses propriétés superposées. C'est-à-dire qu'il lui a retiré la propriété de se déplacer. Nous tirons cet exemple d'un petit livre de vulgarisation déjà ancien mais tout à fait pertinent: « Le Cantique des quantiques », de Sven Ortoli et Jean-Pierre Pharabod, réédition La Découverte, 2004.

Dans le cas de l'électron dans la boîte, si nous nous en tenons à une boîte unique, la non-localité ne sera pas très intrigante. Mais si nous pouvons, sans ouvrir la boîte, la séparer par une cloison en deux sous-boîtes et si nous emmenons l'une de ces sous-boîtes à l'autre bout du monde, l'électron ne sera pas divisé en deux sous-électrons. Il restera tel qu'en lui-même, c'est-à-dire dans le même état, dans chacune des sous-boîtes. Ainsi, si nous modifions l'un des paramètres permettant de décrire l'électron dans l'une de ces sous-boîtes, le même électron, confiné dans l'autre sous-boîte à des milliers de kilomètres, enregistrera la modification – ceci en temps instantané, c'est-à-dire sans possibilité de transmission d'information à distance.

Une autre propriété, encore plus surprenante, des micro-états quantiques est l'**intrication** (entanglement en anglais). Générons une paire de particules par collision, chacune des particules initiales étant décrite par un certain vecteur d'état. Après la collision, qui a emmêlé ou intriqué les deux particules, la paire est décrite de façon identique par un nouveau vecteur d'état. Pour faire cesser cette situation, il faut mesurer l'une de ces particules à un des endroits les plus probables où la trouver (en la faisant interagir avec un détecteur, par exemple). Dans ce cas la fonction d'onde commune est réduite et chaque particule retrouve son état initial. Mais si nos particules, après s'être entremêlées, ont pris des trajectoires séparées et se trouvent distantes de toute la longueur de la galaxie, la mesure pratiquée sur l'une affectera cependant immédiatement l'autre, là encore sans possibilité matérielle de transmission d'information. Le monde quantique se présente ainsi à nous comme un continuum où les états quantiques se transmettent sans considération de temps ni d'espace.

De nombreux physiciens, Einstein le premier, se refusent à croire à la « réalité » d'un

tel phénomène. Ils font la supposition que des « variables cachées » pourraient l'expliquer. Mais jusqu'à ce jour, de telles variables n'ont pas encore été mise en évidence. Au contraire, de plus en plus de scientifiques, notamment en cosmologie, sont conduits aujourd'hui à envisager l'« existence » d'un infra-univers sous-jacent à l'ensemble de tous les autres, que ce soit en cosmologie, en physique quantique ou en physique macroscopique. Il s'agit de ce que l'on nomme maintenant le vide quantique (dit aussi parfois aussi le monde infra-quantique). Le vide quantique, dans cette hypothèse, est loin d'être vide. Il est extraordinairement chaud et dense, constitué de particules qui surgissent en permanence, puis s'annihilent. Le temps et l'espace n'y existent pas. Certaines de celles-ci pourraient se conserver et donner naissance à des bulles d'univers, dont notre propre univers aurait pu naître, à la suite d'un phénomène dont l'origine est encore discutée, mais dont les conséquences sont désormais observées de façon indiscutable, le Big Bang. Avec le Big Bang, le temps et l'espace tels que nous les connaissons seraient apparus, au sein de notre propre univers.

Ajoutons que la physique quantique propose des hypothèses testables sur l'état de l'univers dans ses formes extrêmes. Nous ne sommes pas là dans la cosmologie théorique à proprement parler mais dans la physique des hautes énergies, où la physique quantique, pour interpréter ce que révèlent les grands accélérateurs modernes de particules, offre des hypothèses à expérimenter.

Mais pourquoi parler de vide quantique dans notre essai? Parce que la plupart des événements exploités par les technologies quantiques actuelles y font référence. Ces technologies exploitent les propriétés du vide quantique. De plus les conséquences philosophiques de tels concepts sont et seront de plus en plus considérables. Elles sont largement exploitées par les religions. Elles doivent aussi être étudiées par les matérialistes.

Notre cerveau et le monde quantique

Nous examinerons dans la suite de cet essai les perspectives des sciences du cerveau, cerveau biologique et cerveau artificiel. Il est possible cependant de se demander dès maintenant si notre cerveau pourrait, du moins en son état actuel de développement, se représenter le monde quantique ? Nous sommes dotés d'un cerveau que l'évolution a construit de façon à nous permette de survivre dans un espace-temps newtonien peuplé de prédateurs et de proies qu'il nous fallait identifier pour survivre. Cette machine, admirable à de nombreux égards, est-elle capable de concevoir le monde sub-atomique ? Plus exactement, si manifestement, elle est capable de le concevoir, comme le montrent les développements de la physique quantique, elle n'est pas capable de se le représenter concrètement (l'imaginer, de la visualiser). Pourquoi ?

Dans un de ses livres (Les indispensables de la mécanique quantique), Roland Omnès propose une analyse intéressante. Il rappelle d'abord les mécanismes élémentaires par lesquels nous nous représentons le monde. Il s'agit de l'intuition et de la perception. Notre esprit pense par intuition quand il forme une image intérieure pour donner

corps à une idée, sans qu'il soit nécessaire d'analyser cette image afin de la comprendre. La perception, qui fait appel aux sens, consiste en une construction complexe utilisant les innombrables informations élémentaires (bits) fournies par les organes sensoriels. Ces informations sont trop nombreuses pour être traitées directement. Les neurones coopèrent de façon synchronisée pour construire une représentation continue dans le temps et homogène dans un espace lui-même continu. Or les neurones qui sont actifs dans l'imagination et l'intuition seraient les mêmes que ceux servant à construire l'objet de la perception. Imagination et intuition sont donc « physiologiquement déterminées pour se représenter un espace continu (à trois dimensions) où chaque objet est situé en un lieu défini ».

Par ailleurs le cerveau ne conserve en mémoire que des formes générales significatives, auxquelles il compare les informations sensorielles nouvelles. C'est là le propre de l'abstraction. Enfin, il ne peut se représenter plusieurs choses à la fois. Il doit choisir comme le montre l'expérience bien connue du squelette du cube entre telle ou telle angle de vue. Tantôt le cube est vu de dessus, tantôt il est vu de dessous, mais pas simultanément dans les deux perspectives.

Voici quelques unes des limites de l'intuition rappelées par Roland Omnès:

- nos représentations intuitives du temps et de l'espace sont indépendantes.
- l'espace est perçu comme un continu et nous ne pouvons pas imaginer plus de trois dimensions.
- un objet se trouve à tout instant en un lieu défini, ce qui permet de distinguer deux objets par leur position.
- la réalité est unique et les phénomènes y sont distincts.
- les phénomènes ne changent que graduellement et tout mouvement est continu.

Pendant des millénaires, philosophes et scientifiques ont cru que ces traits étaient propres à la nature. Les choses ont commencé à changer lorsque Planck a émis l'hypothèse des quanta. Aujourd'hui cependant, nous sommes obligés de constater que notre cerveau ne nous permet pas d'imaginer, même sous une forme approchée, le monde quantique. Le point le plus étonnant néanmoins est que ce même cerveau s'est montré capable, par l'abstraction mathématique, de s'en donner des représentations pertinentes.

Ceci pose la question de l'origine évolutionnaire des mathématiques, vaste question que nous n'aborderons pas dans notre essai. Si celles-ci se sont implantées dans les cerveaux des hominiens et y ont prospéré, c'est parce qu'elles étaient également utiles à la survie. Lorsque le cerveau construit les images de proies ou de prédateurs, il doit aussi se montrer capable de les dénombrer (les compter) et de procéder à des simulations fines relatives à leurs futurs mouvements. Le tout en utilisant des algorithmes mathématiques inconscients. Dans ces simulations, l'objet cesse d'être nécessairement localisé et bien défini, le temps peut se contracter ou se dilater. Le monde devient un jeu de probabilités, entre nœuds de réseaux. Ainsi les animaux et nous-mêmes serions nous depuis longtemps dotés de propriétés nous permettant de

survivre dans le monde quantique, si notre monde n'était que quantique. Mais nous venons seulement de nous en apercevoir, croyant jusqu'à ces dernières années n'en avoir pas besoin. Les animaux n'ont peut-être pas fait la même erreur.

Alors, pourrions-nous jamais imaginer le monde quantique? Peut-être, si nous arrivons à modifier quelques uns de nos algorithmes cérébraux. In vivo ou avec des implants?

3.2. Applications actuelles et futures de la physique quantique

Nous l'avons dit, celles-ci sont très nombreuses. Nous en retiendrons trois ici pour fixer les idées: en biologie, en physique des composants électroniques et, pour un proche avenir, en ce qui concerne le ordinateur quantique. Nos exemples sont proposés en termes un peu plus techniques que les chapitres précédents, mais ceci pourra témoigner aux yeux de qui en douterait du sérieux de nos propos.

La biologie quantique

Le terme paraît excessif, mais il est loin de l'être. De plus en plus de biologistes s'intéressant à la physique quantique (ils sont rares) soupçonnent que des particules venues de cet ailleurs qu'est le monde quantique, avec des probabilités infiniment faibles mais non nulles, peuvent s'introduire dans les atomes de molécules organiques à des emplacements déterminants pour l'évolution de la vie et de la pensée, par exemple au sein d'un ADN ou d'un neurone.

Les hypothèses selon lesquelles des mécanismes fondamentaux du monde vivant ne se produiraient pas sans l'intervention de phénomènes quantiques sont de plus en plus nombreuses. Ceux-ci, par leurs propriétés fondamentales (superposition d'état, non localité notamment) rempliraient dans le vivant des rôles essentiels, que les atomes et molécules du monde dit macroscopique ne pourraient pas assurer. On a souvent dit que le milieu biologique, chaud et humide, ne pouvait permettre aux particules quantiques de conserver leur "cohérence", c'est-à-dire de ne pas devenir des particules comme les autres au contact de la matière ordinaire. Mais un nombre croissant d'expériences confirme qu'il n'en est rien. La biologie quantique paraît une réalité dont aujourd'hui encore on n'étudierait qu'un nombre limité d'exemples.

Deux séries d'expériences, ayant fait l'objet de publications, illustrent cette constatation. Elles ne concernent pas des phénomènes nouveaux, car les domaines en cause avaient été évoqués depuis quelques années. Il s'agit de la fonction chlorophyllienne dans les cellules végétales et des vibrations se produisant à l'intérieur des microtubules des neurones cervicaux, susceptible de jouer un rôle dans la production de la conscience. Ce sont les mécanismes quantiques supposés les produire qui se précisent aujourd'hui.

* La fonction chlorophyllienne.

Les processus grâce auxquels les cellules végétales recueillent et utilisent la lumière afin de fabriquer les molécules de la chimie organique dont elles ont besoin semblent n'avoir pas d'équivalents dans la physique classique. Les macromolécules qui jouent ce rôle sont composées de chromophores (responsables de la couleur verte) attachés aux protéines de la cellule et constituant le premier stade de la photosynthèse. Elles capturent les photons de la lumière solaire et transfèrent l'énergie associée vers le reste de la cellule.

Aujourd'hui des chercheurs de l'University Collège London pensent avoir identifié des processus quantiques assurant l'efficacité de cette fonction, dont il n'existerait pas d'équivalents dans la physique classique. Selon leurs observations, les vibrations des chromophores responsables du transfert d'énergie ne pourraient pas se produire classiquement. Leur efficacité dépendrait de mécanismes quantiques.

Les vibrations moléculaires résultent de mouvements périodiques des atomes dans une molécule. Quand deux chromophores vibrent à l'unisson, une résonance apparaît et des échanges efficaces d'énergie peuvent se produire. Dans certaines conditions que nous ne décrirons pas ici, des unités discrètes d'énergie, autrement dit des unités quantiques, sont échangées. Ceci en un très court temps (inférieur à la picoseconde) et à température ambiante.

Mais ne s'agit-il pas de processus de la physique classique ? Les chercheurs montrent qu'il n'en est rien. En physique classique les probabilités de trouver les chromophores dans certaines positions et impulsions seraient positives, autrement dit il serait possible de prévoir ces positions et impulsions. Or l'expérience montre que ceci n'est pas possible. Les chromophores ne peuvent être identifiés en position et impulsion que d'une façon probabiliste, autrement dit collective, ce qui rend impossibles les prédictions individuelles. Il s'agit donc bien d'un mécanisme quantique, correspondant à l'échange cohérent d'un quantum d'énergie. Une superposition d'états quantiques, non prédictible en physique classique, s'établit entre excitations et transferts de charge à l'intérieur du chromophore.

D'autres processus quantiques proches ont été identifiés. Nous nous bornerons à les évoquer. Il s'agit des changements structurels qu'enregistrent les chromophores associés à la vision lors de l'absorption de photons ou de la reconnaissance d'une protéine par une autre lors de l'olfaction. Pour explorer plus en profondeur ces phénomènes indispensables au fonctionnement des organismes supérieurs, il faudrait examiner les dynamiques vibratoires associées. Elles constituent clairement, selon les chercheurs, des phénomènes non classiques, c'est-à-dire relevant de la physique quantique. Les théories proposées sont très complexes et ne peuvent être présentées et moins encore discutées ici. On se bornera à retenir la conclusion générale qui s'en dégage: les organismes biologiques trouvent leurs origines dans la physique quantique. Ceci pourrait contribuer à l'idée que la vie serait universelle dans l'univers, car cette physique n'est pas associée nécessairement aux conditions observées sur la

Terre par des organismes comme les nôtres, qui se sont développées en exploitant les propriétés déterministes de la physique macroscopique. Elle pourrait dominer dans d'autres planètes.

* Le rôle des phénomènes quantiques dans la production de la conscience

Stuart Hameroff et (Sir) Roger Penrose avaient présenté il y a une vingtaine d'années l'hypothèse selon laquelle la production des faits de conscience, dont la nature et l'origine demeurent largement encore inconnues, dériveraient d'activités se produisant aux niveaux profonds des neurones cervicaux. Seraient impliqués les microtubules. Celles-ci sont des fibres constitutives du cytosquelette ou "squelette des cellules" au même titre que d'autres filaments. Pour Penrose, qui s'était fait précédemment connaître par son platonisme, la conscience, comme les mathématiques, permet de prendre contact avec le monde des idées, lequel représente l'univers fondamental.

Or, dans la ligne de la découverte des vibrations quantiques dans les chromophores (dont sont évidemment dépourvus les neurones), des chercheurs japonais suivis par d'autres ont conclu que des phénomènes voisins se produisaient au niveau des microtubules neuronales. Ainsi se trouverait confortée l'hypothèse initiale de Hameroff et Penrose. Celle-ci était demeurée très contestée – d'autant plus que l'anesthésiologiste Stuart Hameroff s'était engagé ensuite dans des considérations considérées comme douteuses sur la vie après la mort.

Les auteurs de l'article référencé ci-dessous suggèrent que les ondes du cerveau identifiées depuis longtemps par les techniques d'électro-encéphalographie dérivent de vibrations profondes au niveau des microtubules. L'origine de ces ondes était restée jusqu'ici non élucidée. Hameroff et Penrose avaient à l'époque suggérée que des phénomènes vibratoires au sein des tubulines modifiaient les réactions du neurone ainsi que celles des synapses. Ils participaient de ce fait à un grand nombre d'activités neurologiques, dont celles relatives à ce que l'on nomme la conscience chez l'homme et les animaux supérieurs. Mais Hameroff et Penrose n'avaient pu le prouver.

Roger Penrose vient, avec d'autres collègues, de reprendre ses hypothèses initiales à la lumière des phénomènes vibratoires quantiques mentionnés ci-dessus et se produisant dans diverses cellules, végétales et animales. D'autres chercheurs, dans le même esprit, suggèrent que l'anesthésie, qui fait disparaître la conscience, sans paralyser le reste des activités cérébrales, modifie également l'activité des microtubules.

Dès que l'on parle conscience, les esprits spiritualistes et religieux s'agitent, notamment aux Etats-Unis. La conscience ne serait-elle pas un don conféré par Dieu aux humains. Au contraire, selon l'hypothèse matérialiste, elle aurait émergé progressivement dans les cerveaux du fait de computations se complexifiant

progressivement au fil de l'évolution. Pour Hameroff et Penrose, aujourd'hui, il paraît clair que des vibrations quantiques dans les microtubules interviennent directement dans les fonctions neuronales et synaptiques. Elles connectent ainsi le cerveau aux processus auto-organiseurs pré-conscients qui constitueraient en profondeur la réalité quantique.

Les théistes pourront toujours suggérer, comme habituellement dans ces matières, que c'est en fait Dieu et non l'évolution qui a mis au point chez l'homme les processus générateurs de la conscience. Mais les scientifiques éviteront ces incursions métaphysiques. Ils ont devant eux suffisamment de travail pour étudier en finesse ce en quoi consistent effectivement les vibrations quantiques au sein des cellules. Il leur faut dorénavant montrer en effet qu'il ne s'agit pas d'une explication facile analogue – puisque nous avons évoqué l'anesthésie, à la "vertu dormitive" de l'opium.

Les composants électroniques

Comme aux premiers temps de l'informatique, les ordinateurs et toutes les machines numériques, tablettes, téléphones portables..., travaillent pour l'essentiel selon la logique de l'algèbre de Boole. Les chiffres binaires zéro et 1 y sont représentés par des transistors ou positions de mémoire (bits) qui prennent l'une ou l'autre valeur selon le courant électrique reçu.

Un intense travail de miniaturisation, accompli depuis le premier ordinateur scientifique, l'ENIAC *Electronic Numerical Integrator Analyser and Computer* (1943), jusqu'à l'un des premiers ordinateurs commerciaux, l'IBM 1401 (1959), et poursuivi ensuite, notamment avec l'IBM 360, avait permis de remplacer dans les unités centrales, c'est-à-dire dans le coeur des machines, les unités logiques initialement représentées par des tubes à vide ou lampes, par des transistors de taille de plus en plus réduite. Il en fut de même pour les mémoires internes, celles stockant par exemple les instructions des programmes installés dans l'ordinateur par l'utilisateur, ou les résultats temporaires des calculs effectués par l'unité centrale.

Les mémoires externes, dédiées à la mémorisation avant usage des données introduites par l'utilisateur ou la conservation pour diffusion des résultats définitifs des calculs, restaient essentiellement constituées de cartes perforées ou de bandes magnétiques. Mais là aussi l'encombrement avait considérablement diminué, tandis que la vitesse et la sécurité d'exploitation augmentaient.

La miniaturisation, la vitesse et la sécurité ont continué depuis à augmenter pendant un demi-siècle, sur un rythme quasi exponentiel. Aujourd'hui, le moindre téléphone portable est un million de fois plus rapide que l'ENIAC, et presque cent mille fois plus petit. Ses capacités de mémoire, qui d'externes sont devenues internes, sont dans les mêmes proportions. Mais on annonce régulièrement que ce mouvement ne pourra se poursuivre. La miniaturisation a un coût. Plus les composants sont petits, plus le

courant électrique qu'ils utilisent doit perdre de l'intensité, afin de ne pas les griller. En contrepartie, ce courant devenu trop faible subit des fluctuations aléatoires de charge, pouvant diminuer la fiabilité des transistors chargés des calculs, ou des mémoires enregistrant les résultats de ceux-ci. Ceci au point que les transistors modernes peuvent enregistrer d'importantes variations de performance, générant des bugs.

De plus, la concentration des transistors, même de très petite taille, dans un espace de plus en plus réduit, génère de la chaleur qu'il faut combattre. Les barrières à la miniaturisation semblent atteintes. Autrement dit, la Loi de Moore cesse de s'appliquer, selon laquelle les capacités des composants électroniques croissent régulièrement d'une année à l'autre.

Il fallait trouver autre chose, à une très grande échelle. Pourrait-on compter sur la dispersion et le travail en réseau des "puces" ou unités de calcul introduites dans les centaines ou milliers d'objets "intelligents", répandus dans l'espace social ? Elles rempliraient des fonctions spécialisées qui déchargeraient d'autant la charge de travail des unités centrales intégratrices. Ceci n'est pas impossible, dans une certaine mesure. Il restera cependant que les calculs centralisés à grande vitesse demeureront indispensables, même dans l'existence quotidienne. Ainsi, en ce qui nous concerne, en tant qu'ordinateurs biologiques, si nous disposons de l'équivalent de petits ordinateurs dans chacun de nos organes corporels, nous avons toujours besoin d'un cerveau puissant et rapide pour intégrer leurs résultats et élaborer en réponse des comportements globaux.

*La spintronique

C'est alors qu'est intervenue ce que l'on appelle généralement la spintronique. Cette nouvelle technique s'appuie sur les propriétés des particules quantiques dites spin. Elle est issue des travaux sur la magnétorésistance dite géante (GMR) menés à partir de la fin de la décennie 1980 et ayant conduit aux découvertes qui ont permis aux français Albert Fert de l'université Paris Sud et à l'allemand Peter Grünberg de Centre de Recherche Jülich d'obtenir le Prix Nobel 2007 (voir lien ci-dessous).

Comment définir la spintronique ? Le spin est une propriété quantique d'une particule qui, d'une manière imagée est décrite comme tournant sur elle-même de même qu'une toupie. Dans le monde quantique, cette rotation ne produit pas un mouvement physique (moment cinétique) mais un mouvement magnétique. Une particule possédant un spin se comporte comme un minuscule aimant, dont les pôles peuvent basculer du haut (*spin up*) vers le bas (*spin down*) et réciproquement, lorsque l'on applique à l'électron un champ magnétique approprié, fut-il très faible.

Les dispositifs spintroniques exploitent cette propriété, qui permet de stocker de l'information. Le support matériel, celui par exemple du disque dur d'un ordinateur, est divisé en zones microscopiques correspondant à autant de bits d'information. Un champ magnétique est appliqué bit par bit pour orienter les spins des électrons des

atomes du support. Chaque zone correspondra alors à un bit de valeur zéro ou 1 selon l'orientation (haut ou bas) des spins dans cette zone. Un courant électrique traversant un matériau ferromagnétique va voir la proportion d'électrons spin down et spin up de celui-ci se modifier. On dit que ces électrons sont polarisés en spin. De ce fait, on arrive à inscrire une information dans le spin des électrons.

Un second matériau ferromagnétique traversé par ce courant polarisé en spin exercera une résistance différente selon la polarisation du courant et l'orientation de l'aimantation du matériau. Une mesure de la résistance électrique permettra de lire l'information représentée par le spin des électrons.

L'utilisation conjointe de matériaux aimantés et de l'électronique constitue la base des applications spintroniques. Le phénomène clé à maîtriser reste le contrôle précis de l'orientation de l'aimantation des matériaux ferromagnétiques. Or celui-ci était impossible à contrôler autrement que par l'application d'un champ magnétique, technologiquement difficile à intégrer dans la fabrication des circuits électroniques.

Or il a été découvert expérimentalement en 1999 qu'un courant constitué d'électrons polarisés en spin, c'est-à-dire doté d'une certaine orientation, up ou down, était capable d'agir sur l'orientation de l'aimantation d'un matériau ferromagnétique par le transfert de l'orientation des électrons constituant le courant sur les électrons responsables de l'aimantation dans le matériau ferromagnétique. L'information ainsi stockée est lue par les têtes de lecture, sans être détruite. La tête de lecture enregistrant des variations de résistance électrique en fonction de l'orientation des champs des particules survolées envoie à l'unité centrale des impulsions correspondants à des zéros ou des uns à partir desquels peuvent être effectués des calculs en algèbre booléenne.

L'utilisation traditionnelle de l'état d'un électron dans un semi-conducteur est un système binaire, puisque cet état représente seulement 1 ou zéro. Dans ce cas, 8 bits peuvent représenter tous les nombres entiers entre zéro et 255, mais ceci pour un seul nombre à la fois, ce qui limite les capacités de calcul. Par contre, faire appel aux propriétés quantiques des particules, nommées de ce fait des **qubits**, permet d'exploiter les états spin up et spin down comme une superposition de zéro ou 1. Ainsi 8 qubits couplés possèdent la propriété de représenter tous les nombres entiers entre zéro et 255 de façon simultanée. Les capacités de calcul et de mémorisation sont considérablement augmentées - à condition il est vrai de disposer des logiciels nécessaires.

* La spintronique et les mémoires

Cette propriété, que l'on cherche à exploiter à plus grande échelle dans les ordinateurs quantiques, permet d'ores et déjà d'accroître considérablement les capacités de stockage et les temps de réponse des mémoires modernes. Aujourd'hui, en pratique, la spintronique est d'abord utilisée au niveau des composants qui, tels jadis la bande

magnétique, stockent les données nécessaires à tout calcul, sans cependant réaliser les opérations d'algèbre booléenne indispensables au calcul proprement dit ou aux raisonnements logiques qui s'accomplissent au coeur des calculateurs, quelle que soit leur taille.

Depuis une quinzaine d'années, des supermémoires ont été réalisées, permettant de conserver avec une grande fiabilité des quantités considérables d'information, puis de les restituer à l'utilisateur après tris, de façon à les rendre utilisables. Elles disposent de noms divers que nous ne mentionnerons pas ici. Il s'agit le plus souvent de mémoires dites **flash**.

La mémoire flash est une mémoire de masse à semi-conducteurs réinscriptible, c'est-à-dire une mémoire possédant les caractéristiques d'une mémoire système aussi appelée RAM de l'anglais *Random Access Memory* (ou mémoire à accès direct). Cette dernière a toujours été la mémoire informatique ou vive dans laquelle un ordinateur place les données lors de leur traitement et qui ne doivent pas disparaître lors d'une mise hors tension. Le prix de la RAM et son encombrement empêchaient de l'utiliser comme mémoire de masse dans les appareils destinés au grand public, telle une clef USB. La mémoire flash a permis de résoudre cette difficulté. Elle stocke les bits de données dans des cellules qui les conservent en mémoire lorsque l'alimentation électrique est coupée.

La vitesse élevée d'une mémoire flash, sa durée de vie et sa faible consommation, nulle au repos, la rendent indispensable pour de nombreuses applications : appareils photo numériques, téléphones cellulaires, imprimantes, assistants personnels (PDA), ordinateurs portables ou dispositifs de lecture et d'enregistrement sonore comme les baladeurs numériques, clés USB, etc. De plus, ce type de mémoire ne possède pas d'éléments mécaniques, ce qui lui confère une grande résistance aux chocs.

Or il faut bien voir que les mémoires de type flash n'auraient pu exister sans la spintronique, c'est à dire sans la physique quantique. L'objectif des recherches sur la spintronique n'était pas initialement d'obtenir de nouveaux transistors pour les unités centrales de calcul, mais des mémoires capables de résister à la miniaturisation des disques durs. C'est alors qu'est intervenu la Magnéto-résistance géante (GMR) ou effet magnétorésistif géant, découverte par Albert Fert et Peter Grünberg mentionnée ci-dessus. Son utilisation dans les têtes de lecture des disques durs actuels est la première application de la spintronique.

Pourquoi parler de spintronique ? Qu'est-ce que le spin d'une particule en ce cas ? Il s'agit d'un effet quantique observé dans les structures de films minces composées d'une alternance de couches ferromagnétiques et de couches non magnétiques. Il se manifeste sous forme d'une baisse significative de la résistance observée sous l'application d'un champ magnétique externe : à champ nul, les deux couches ferromagnétiques adjacentes ont une aimantation antiparallèle, car elles subissent un couplage ferromagnétique faible. Un champ magnétique externe induit un

renversement d'aimantation: les aimantations respectives des deux couches s'alignent et la résistance de la multicouche décroît brutalement. L'effet se produit parce que le spin des électrons du métal non magnétique se répartit équitablement de façon parallèle et antiparallèle, et subit ainsi une diffusion magnétique moins importante lorsque les couches ferromagnétiques sont aimantées de façon parallèle.

L'une des premières applications de la GMR fut de réaliser un capteur de champ magnétique pouvant constituer un nouveau type de tête de lecture dans les disques durs d'ordinateurs. Le premier dispositif utilisant la magnétorésistance géante a été commercialisé par IBM en décembre 1997. Depuis 1999 environ, les recherches portent sur l'emploi de nanofils organisés en multicouches, mais également sur l'emploi de nombreux types de matériaux nanostructurés (agrégats, nanoparticules piégées dans des substrats diélectriques, etc.);

Le phénomène de magnétorésistance géante reste très utilisé dans les têtes de lecture GMR des disques durs modernes. Les mémoires magnétiques non volatiles (ou MRAM) en sont une autre application. Cette technologie est très prometteuse pour remplacer un certain nombre de disques durs sous la forme de SSD. Un SSD, pour *solid-state drive* est un matériel informatique permettant le stockage de données sur de la mémoire flash. La mémoire flash, comme indiqué plus haut, est une mémoire de masse à semi-conducteurs réinscriptible, c'est-à-dire une mémoire possédant les caractéristiques d'une mémoire vive mais dont les données ne disparaissent pas lors d'une mise hors tension.

Le terme anglais "*solid-state*" signifie que ce matériel est constitué de mémoires à semi-conducteurs à l'état solide par opposition aux disques durs classiques, sur lequel les données sont écrites sur un support magnétique en rotation rapide. Un SSD est matériellement plus solide qu'un disque dur, Cette spécificité lui permet une résistance aux chocs et aux vibrations bien plus importante que celle des disques mécaniques, ce qui est important pour tous les appareils portables. Les SSD surclassent les disques durs classiques au niveau de la performance (débit, latence, consommation). Néanmoins, le rapport prix-espace de stockage reste encore largement à l'avantage du disque mécanique en 2014.

* Mémorisation des données dans les grands serveurs (Data Centers)

Nous avons indiqué ci-dessus la substitution de mémoires flash aux mémoires traditionnelles dans les différents matériels portables avait considérablement accru leurs capacités de stockage, leur fiabilité, leur portabilité, tout en réduisant leurs coûts. Par ailleurs les temps d'accès sont considérablement réduits et le contenu des mémoires ne s'efface pas quand l'appareil est éteint.

Mais pourquoi n'ont-elles pas été utilisées plus tôt pour la mémorisation des énormes quantités de données dans les grands Data Centers, notamment ceux de la NSA ou de Google? Outre leurs coûts en matériel, la complexité croissante des logiciels

permettant de les exploiter rapidement, ces centres consomment des quantités considérables d'électricité et d'eau. Si bien que les Démocrates de l'Utah ont menacé de couper l'eau au centre de la NSA à Bluffdale, pour la forcer à limiter ses intrusions dans les fichiers privés. C'est que manquaient encore des idées ingénieuses pour les exploiter à grande échelle.

Ceci ne devrait plus être le cas. Des chercheurs du MIT viennent de présenter à [*l'International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays*](#) à Monterey, Californie, de nouveaux procédés de stockage utilisant des mémoires flash, afin de gérer les Big data. Les données peuvent être accédées au hasard (sans programmation préalable) avec des temps de réponse réduits de mille fois, par rapport aux temps actuels de 12 millisecondes déjà obtenus sur les disques durs traditionnels. De plus les contenus ne sont pas volatils.

La solution proposée, nommée Blue Database Machine (Blue DBM), connecte un certain nombre de mémoires flash à un *field-programmable gate array* (FPGA), autrement dit un circuit logique programmable, ou réseau logique programmable. Il s'agit d'un circuit intégré logique qui peut être reprogrammé après sa fabrication. Ces FGPA sont intégrés à des puces FGPA afin de créer des noeuds-relais individuels afin d'accomplir des opérations sans déplacer les données. Ces puces elles-mêmes peuvent être connectées à un réseau de haute performance permettant les calculs en série. Il en résulte que les informations individuelles présentes dans chacun de ces noeuds peuvent être accédées avec un temps de réponse de quelques nanosecondes.

Enfin, avec de multiples noeuds, il est possible d'obtenir la même largeur de bande et les mêmes performances que celles fournies par des centres de données classiques bien plus coûteux. Les chercheurs construisent actuellement un réseau prototype de 16 noeuds, chaque noeud pouvant traiter 3 gigabits par seconde, avec une capacité de 16 à 32 terabits. Des applications pour la gestion des Big data sont par ailleurs en cours de réalisation. Quelle que soit l'importance des bases, les temps de réponse devraient être si courts que le système global paraîtra réagir en temps réels. Des chercheurs de l'université de Washington sont même allés jusqu'à envisager une « gestion des particules de l'univers » afin notamment de simuler leurs interactions à l'échelle cosmologique.

Ce pas en avant considérable, s'il se confirme, montre que les différents progrès techniques repoussent de plus en plus les limites fixées par l'historique Loi de Moore. Les applications scientifiques civiles seront très nombreuses, dès lors que de vastes bases de données doivent être manipulées. Citons en particulier la réalisation d'un cerveau artificiel, le grand enjeu des prochaines années. Il montre aussi, hélas pour l'Europe, que les capacités d'innovation du complexe scientifico-industriel américain (pour ne pas parler de militaro-scientifico-industriel), ne cessent de se développer, quelle que soit la crise économique subie par les Etats-Unis, accroissant d'autant le

retard de l'Europe.

Comme on le devine, les services qui tels la NSA ou la CIA exploitent les grands Data Centers, associés à des géants américains du web tels que Google ou Facebook, se verront considérablement encouragés à continuer. Menacer de leur couper le compteur d'eau ne pourra plus leur faire peur.

* La spintronique et les processeurs de l'unité centrale

Tout ce que nous venons de décrire concerne, d'une façon générale, les mémoires et la capacité d'y accéder, avec plus ou moins de vitesse et de facilité. Mais aujourd'hui, les chercheurs en spintronique s'attaquent aux processeurs qui constituent le cœur de toutes les machines, quelles que soient leurs tailles. Ceux-ci sont constitués aujourd'hui de centaines de millions de transistors dont l'état, 1 ou zéro, bascule en fonction des courants qui leur sont appliqués. Ces changements d'état permettent d'établir des portes logiques, chacune d'elles étant dédiée à une seule opération. Ainsi une porte NAND (Negated AND or NOT AND) produit un zéro si les deux entrées dans la porte sont 1. Si l'une des entrées est zéro, le produit est 1. Et réciproquement.

Dans l'électronique traditionnelle, la plupart des fonctions booléennes peuvent être accomplies par de telles portes, qui sont constituées de combinaisons de transistors. L'écriture-lecture d'un simple e-mail et a fortiori d'un article comme celui que vous lisez ici, entraîne la mise en jeu de millions de portes, en fonction de l'importance du programme utilisé. Ceci exige l'accumulation de centaines de millions de portes qui encombrant l'unité de traitement pour des résultats pouvant être très banaux – sans mentionner la consommation de courant et la déperdition de chaleur en résultant. La diminution de taille des matériels, fussent-ils portables, se heurte par ailleurs de plus en plus, selon les fonctions exigées, à des limites dont la plupart paraissent atteintes aujourd'hui. Il était donc tentant de faire appel au spin des électrons, plutôt qu'à des courants électriques. Leur état, 1 ou zéro, une fois établi demeure établi, et n'a pas besoin d'être entretenu. D'où des économies de courant et de dispositifs de refroidissement.

C'est ce qu'a permis la spintronique. Différents chercheurs ont démontré à partir de 2007 la fiabilité du "*spin processing*" à partir d'un "*spin transistor*". Ce premier dispositif améliore le fonctionnement du transistor classique en faisant appel au spin, tel que décrit dans la première partie de cet article. Mais il était inévitable de chercher à faire beaucoup mieux. Aujourd'hui, une véritable électronique à base de spin-transistors est en cours de développement. On parle de *Spin-Transistor Electronics*. Elle repose sur des composants utilisant deux courants spin-polarisés en entrée, et deux contacts magnétiques dont les spins peuvent être changés à la demande. Il en résulte une porte dont le fonctionnement logique devient modifiable "à la volée". On emploie parfois le terme de flexi-logique.

Au lieu de disposer de matériels dont le type de chacune des portes logiques est fixé

irrévocablement à la construction, des portes qui peuvent se recâbler elles-mêmes offre l'équivalent d'un costume dont les dimensions peuvent être modifiées à la demande et très rapidement en fonction des exigences du client.

Malgré ces avantages, il ne faut pas espérer que les composants et processeurs traditionnels seront rapidement abandonnés. Le coût de nouvelles fonderies, devant maîtriser une physique encore mal connue et difficile à implémenter, ralentira le mouvement. La "vieille" électronique survivra tant que ses limites physiques et économiques ne seront pas atteintes, au regard des besoins nouveaux qui se manifesteront. Les experts prévoient en général une décennie avant que la spintronique, déjà très installée nous l'avons vu dans le domaine des mémoires, ne transforme le coeur des processeurs.

* La spintronique et la simulation des circuits cérébraux

De nouveaux besoins pourront cependant se faire sentir rapidement, qui élargiront d'une façon quasi exponentielle les perspectives de la spintronique. Il s'agira de simuler le fonctionnement des échanges inter neuronaux et des opérations logiques accomplies par le cerveau. Celui-ci, comme nul n'en ignore, ne travaille pas sur le mode séquentiel, mais de façon massivement parallèle. De plus les neurones ne s'excitent que si les signaux que chacun d'eux reçoit dépassent un certain seuil.

Très récemment, le fabricant de puces Qualcomm, installé à San Diego, a annoncé qu'il comptait fabriquer et vendre prochainement des *puces neuromorphiques* qui regroupées en circuits complexes, pourraient offrir les mêmes performances que les neurones biologiques.

Mais la physicienne française Julie Grollier de l'unité mixte de physique CNRS/Thales (voir liens ci-dessous) rappelle qu'il faut des dizaines de transistors pour représenter un seul neurone et de nouvelles dizaines pour une seule synapse. L'équipe qu'elle dirige, assistée d'Albert Fert, propose une approche différente. Il s'agit de ce qu'elle a nommé un *spin memristor*, visant à tirer un meilleur parti des propriétés quantiques du spin. C'est une porte dont les sorties peuvent être définies par un courant prenant toutes les valeurs possibles, entre le zéro et le un. Les spécialistes se référeront à un article de l'équipe lequel vient de paraître dans Nature Physics "[Vertical-current-induced domain-wall motion in MgO-based magnetic tunnel junctions with low current densities](#)".

Selon Julie Grollier, un seul spin memristor pourrait fonctionner comme une synapse, offrant une résistance programmable simulant la force des connexions interneuronales. Les neurones eux-mêmes pourraient être simulés par d'autres types de spin memristors dont les couches magnétiques plus épaisses demanderaient un certain seuil dans le courant de spin pour basculer d'un état à l'autre.

Il est trop tôt pour l'affirmer, mais on peut penser que ces travaux tout récents, où la

France répétons-le tient une part importante, devraient apporter des éléments très efficaces dans la construction de cerveaux artificiels qui se poursuit par ailleurs.

Avec l'ensemble des perspectives évoquées dans cet article, l'avenir de la spintronique paraît assuré. Les jeunes ingénieurs-chercheurs, s'ils ne le sont pas encore, devraient en être persuadés. L'ingénierie financière, qui a mobilisé ces dernières années beaucoup de matière grise, devrait par comparaison reprendre une place plus modeste.

Le calculateur quantique

Il faut suivre de près les progrès vers le calculateur quantique. Ceci pour trois raisons:

- l'intérêt scientifique, consistant à maîtriser les entités quantiques, dites q.bit, dans des applications faisant appel aux propriétés particulières de celles-ci (encore mal comprises au plan théorique) : superposition, intrication, non localité notamment,
- l'intérêt, plus généralement, consistant à pouvoir utiliser des calculateurs extrêmement puissants pour résoudre les innombrables problèmes technoscientifiques butant actuellement sur l'insuffisance des moyens de calcul,
- l'intérêt géostratégique. Le pays qui se donnera en premier les moyens d'utiliser de tels calculateurs pour notamment briser les barrières cryptographiques ou gérer les big data, dominera nous l'avons indiqué tous ses rivaux. C'est pourquoi il convient d'être très attentifs, sinon alarmés, lorsque l'on apprend que la NSA (en collaboration avec Google) est [en train de développer ce type de calculateur](#), à partir semble-t-il de solutions offertes par la firme canadienne [D-Wave Systems](#).

Les solutions proposées par celle-ci sont parfois contestées, notamment par IBM. Mais ceci est de bonne guerre. En conséquence il est très intéressant d'apprendre, dans un article publié par *Nature photonics*, qu'une collaboration internationale (en majorité européenne) conduite par le Pr Mark Thompson, de l'université de Bristol (UK), a réussi à générer et manipuler des photons sur une puce de silicium. Pour voir l'intérêt de l'enjeu, il faut savoir que les prototypes de calculateurs quantiques actuels nécessitent de gros moyens techniques pour générer, conserver à l'abri de la décohérence et faire travailler ensemble un nombre de q.bits (aux alentours de la dizaine) permettant de commencer à réaliser des calculs d'un intérêt suffisant. Dans la technologie du calculateur quantique dit optique (utilisant des photons comme q.bits) il faut notamment installer d'encombrantes sources de lumière pour générer les photons.

Or la nouvelle puce rassemble des composants fortement miniaturisés capables de générer des photons dans la puce elle-même. Les premiers essais ont montré que le travail en commun des dispositifs intégrés dans la puce permet de produire des photons identiques de haute qualité, d'une façon reproductible. On peut donc espérer

fabriquer industriellement de telles puces de silicium comportant des centaines de générateurs de photons analogues, tous travaillant en commun. Il s'agirait en fait d'un ordinateur quantique optique de format réduit, capable de s'attaquer aux calculs les plus compliqués.

Les sources de photons isolés, les détecteurs et les circuits ont été réalisés séparément sur une base de silicium, puis intégrés selon les techniques utilisées actuellement par les fabricants de composants dans le domaine digital. L'ensemble permet d'obtenir des micro-puces d'un millimètre carré capables de générer et manipuler le processus essentiel du ordinateur quantique qu'est l'intrication.

On notera que c'est Toshiba Corporation (Japon), aujourd'hui important concepteur de composants classiques, qui a réalisé le produit prototype. L'équipe comprend, outre des chercheurs de l'université de Bristol, des représentants de Toshiba, ainsi que des universités de Stanford, de Glasgow et de Delft. Après avoir travaillé 5 ans sur ce projet, l'équipe espère dans les deux prochaines années réaliser des ordinateurs quantiques photoniques suffisamment performants pour rivaliser avec des ordinateurs conventionnels et pouvoir s'attaquer à des calculs hautement spécialisés.

Restera aussi à produire les logiciels adéquats, ceux existant actuellement ne paraissant pas être au niveau nécessaire.

Le [Centre for Doctoral Training in Quantum Engineering](#) de l'université de Bristol va former de nouvelles générations d'ingénieurs, scientifiques et industriels capables de maîtriser collectivement les possibilités offertes par la physique quantique, puis, pourquoi pas, conduire la révolution du ordinateur quantique, longtemps espérée mais sans résultats vraiment concluants à ce jour.

A supposer que les annonces objets de la publication dans *Nature Photonics* tiennent leurs promesses (de nombreux chercheurs publient des résultats mal démontrés pour obtenir des subventions), il faudra se demander si ces projets seront mis dans le domaine public, ou brevetés de façon à les rendre inaccessibles aux concurrents. Au-delà, quelle Grande Puissance se donnera la maîtrise du développement et des usages des nouveaux produits, tant dans les domaines civils que militaires ?

Chapitre 4. La cosmologie quantique

La cosmologie est l'étude scientifique de ce que l'on nomme le cosmos. Ce terme a vu sa portée s'élargir au cours des siècles. D'abord limitée à l'étude du ciel terrestre, celle-ci s'est étendue ensuite au système solaire, à la galaxie puis au delà, à ce que l'on nomme l'univers visible. L'univers visible n'est plus seulement observable par les observatoires optiques, mais par les observatoire recevant différentes gammes

d'ondes électromagnétiques provenant de l'espace. Il s'agit là encore de cosmologie observationnelle. Mais, inévitablement, quasiment dès les origines, s'est construite une cosmologie théorique proposant des modèles analogiques puis désormais mathématique et informatique du cosmos, non vérifiables avec les moyens d'observation du moment. Ces modèles intéressent, non seulement l'univers visible ou potentiellement visible, mais des univers qui seront durablement ou indéfiniment invisibles.

Le propre d'un modèle scientifique est de suggérer des hypothèses susceptibles d'être mis à l'épreuve de l'expérience instrumentale. Ce fut longtemps le cas. Ainsi les modèles de Newton ont été vérifiés par l'observation astronomique, puis complétés par des modèles plus complexes. Ceux-ci ont d'abord été proposés par le calcul, comme en ce qui concerne les théories de la relativité générale et de la relativité restreinte. Mais à leur tour ces derniers ont été confirmés par des expériences astronomiques ou satellitaires. Très vite, cependant, la cosmologie théorique a dépassé le champ de l'observation disponible compte tenu des technologies du moment. Elle a proposé des explications encore non vérifiables concernant des phénomènes constatés mais non expliqués comme ceux liés aux origines immédiates de l'univers (le Big Bang supposé) ou aujourd'hui à la matière noire et l'énergie noire. Dorénavant elle s'est enhardie jusqu'à faire envisager des domaines qui ne pourront jamais être vérifiés – sauf changements radicaux de nos représentations du cosmos. C'est le cas par exemple de ce qui se passe à l'intérieur d'un trou noir, ou concernant le milieu cosmologique qui aurait pu préexister avant la naissance de notre univers.

La question paraîtra à beaucoup de lecteurs trop théorique pour retenir l'intérêt. Pour notre part, nous la considérons comme fondamentale parce qu'elle va bien au delà de ce que permet une cosmologie ne faisant appel qu'aux lois macroscopiques s'appliquant à notre univers. La cosmologie quantique permet de jeter un regard constructif sur les grandes questions qui ont toujours préoccupé tant les spiritualistes que les matérialistes: l'origine de l'univers, son évolution, l'émergence de la vie et de la pensée, le concept d'infini...et bien d'autres.

A toutes ces questions où la cosmologie rejoint la métaphysique, la physique quantique permet d'apporter des réponses de type matérialiste, autrement dit scientifiques, et non spiritualiste. Ces réponses ne seront jamais définitives, comme en ce qui concerne toutes les démarches scientifiques, mais elles se préciseront de plus en plus dans les prochaines années. Il paraît dans ces conditions tout à fait pertinent d'utiliser le terme de cosmologie quantique pour les regrouper.

Une autre raison d'intérêt est l'augmentation contemporaine du nombre des recherches sur ce thème, augmentation qui devrait se poursuivre dans les prochaines années et décennies. Elle découle des développements qui seront nécessairement rapides, du fait de son intérêt stratégique, de l'ordinateur quantique. Or ce nouvel outil, comme avant lui l'ordinateur digital, provoquera un bouleversement général, non seulement de la société, mais de la pensée. Quant à la cosmologie, les progrès de

l'observation de l'univers résultant de la mise en service de nouveaux instruments bien plus puissants que les actuels se conjugueront avec les ambitions de plus en plus grandes des cosmologistes théoriques, ceux qui construisent des modèles d'univers en utilisant les mathématiques.

Nous avons indiqué que beaucoup de ces modèles et les hypothèses les sous-tendant sont invérifiables expérimentalement, et ne peuvent donc pas faire l'objet d'une réflexion scientifique sérieuse. Ce sera de moins en moins exact. L'ordinateur quantique et les nouveaux instruments évoqués plus haut se conjugueront pour permettre des observations du cosmos de plus en plus approfondies, d'une part, faisant appel à des points de vue de plus en plus innovants, d'autre part. Les hypothèses de la cosmologie théorique quantique seront donc de plus en plus nécessaires pour faire progresser la science.

Le sujet étant vaste, nous nous limiterons ici à évoquer trois questions: l'univers est-il un ordinateur quantique? Peut-on accorder crédit à l'hypothèse des multivers? Qu'en est-il des « cerveaux de Boltzmann » ? Nous avons déjà publié des articles sur ces questions. Il n'est pas inutile de les reprendre en les actualisant.

3.1. L'univers est-il un ordinateur quantique?

Le Pr Seth Lloyd, spécialiste reconnu du calculateur quantique, avait apporté il y a déjà quelques années des réponses à cette question, réponse qui nous paraissent encore d'actualité, malgré les nombreuses publications parues depuis sur ce thème.

Selon lui, il convient de remonter à une époque (si l'on peut parler d'époque puisque le temps n'était pas apparu alors) où l'univers n'existait pas encore, c'est-à-dire avant ce que l'on nomme usuellement le Big Bang. Ce premier postulat est intéressant puisqu'il élimine d'emblée l'idée que l'univers aurait été créé à partir de rien, idée reprise par de nombreuses religions. On admet généralement aujourd'hui qu'avant le Big Bang, considéré dans cette optique comme un événement local, il n'y avait rien ou plutôt rien dont on puisse parler avec certitude. L'hypothèse retenue généralement est que notre univers est né d'une fluctuation dans l'énergie du vide quantique (ou énergie de point zéro). On pourrait dire de façon imagée que ce terme d'énergie du vide désigne un univers sous-jacent à tous les univers possibles, notamment à notre univers. Il est dénué de temps, d'espace et de masse. Son entropie est maximum (infinie ?) dans la mesure où il est impossible de donner la moindre information concernant ce qui s'y trouve. Mais cet univers sous-jacent se manifeste en permanence au niveau de notre univers. D'abord par l'existence des trous noirs, si on conserve l'hypothèse de l'existence de ceux-ci. Mais aussi simplement parce que toutes les particules matérielles qu'étudie notre physique doivent être considérées comme résultant de la décohérence de processus ondes-particules quantiques appartenant au monde quantique.

On peut alors se demander si les «lois de la physique» (telles que nous les décrivons aujourd'hui, c'est-à-dire sous réserve d'une évolution ultérieure de nos connaissances) s'appliquent au vide quantique comme elles s'appliquent à notre univers. Pour certains auteurs, les lois de la physique feraient partie de l'univers sous-jacent à tous les univers possibles. Ces lois de la physique comportent en particulier les lois de la physique quantique. Pour d'autres auteurs, chaque univers, en apparaissant, se dote d'une physique aux lois spécifiques

Quoiqu'il en soit, la physique quantique suggère l'hypothèse que l'énergie du vide n'est pas statique. Elle est bouillonnante. A grande échelle, elle manifeste des fluctuations imprévisibles. En permanence, des particules ou bouffées d'énergie sont créées et d'autres annihilées. Autrement dit, des « bulles d'univers », dotées de temps et d'espace locaux, sont aléatoirement créées et annihilées. On peut admettre que notre univers a été le produit d'une de ces fluctuations. C'est le début de son histoire. Dès le premier temps de celle-ci, le temps et l'espace que nous connaissons sont apparus.

L'essentiel de sa thèse défendue par ceux pour qui l'univers se comporte comme un ordinateur quantique est que la première manifestation d'énergie créée au début du processus décrit plus haut s'est comportée comme un bit d'information. Autrement dit, non seulement il s'est agi d'une particule énergétique capable d'interagir avec celles qui allaient suivre pour former des entités physiques matérielles, mais d'une particule dotée des caractères d'une unité d'information dans la théorie de l'information, c'est-à-dire basiquement de représenter des 0 et des 1 ainsi que toutes les valeurs intermédiaires entre 0 et 1. L'univers se construit en exploitant ses propres capacités computationnelles.

Pour comprendre ceci, il faut porter un double regard sur chacun des changements d'état qui peut affecter la plus élémentaire des parties composant cet univers. Ces changements d'état doivent être vus à la fois comme des actions physiques et comme des opérations informatiques. Il n'y a là en fait que du très banal. Prenons un exemple. Si un rayon ionisant (par exemple un rayon cosmique) modifie l'état d'excitation (ou d'énergie électrique) d'un atome dans une molécule chimique ou biologique, ce rayon entraîne, fut-ce d'une façon non perceptible par nous, une modification de la façon dont l'atome contribue aux propriétés de cette molécule et à son rôle fonctionnel. Nous sommes donc là en présence d'un effet physique.

Mais il s'agit aussi d'un effet informatique dans la mesure où l'atome est engagé de fait, par interaction avec ses voisins, dans un ou plusieurs des circuits logiques qui sont à la base du calcul informatique booléen : ET, OU, NON, COPIE, etc. En effet, modifier l'état de l'atome a pour effet de changer sa valeur informatique, autrement dit de réaliser une opération élémentaire de calcul. Dans la numération binaire, on dira que la valeur informatique de l'atome passera de 0 à 1 ou de 1 à 0 (avec possibilité d'adopter toutes les valeurs intermédiaires entre 0 et 1 si on estime devoir se situer au plan d'une opération analogique et non digitale). Ce changement de valeur informatique aura lui-même un résultat physique obligé.

Ainsi, au cas où l'atome était lié à un voisin dans une porte logique ET, utilisée pour obtenir un niveau de sortie 1 si tout les niveaux d'entrée sont à 1, son changement d'état transforme la sortie 1 en sortie 0, ce qui peut modifier non seulement l'état physique immédiat de la molécule mais la façon dont celle-ci, considérée à son tour comme un élément de calcul dans un réseau plus vaste, interagit avec le reste de son environnement physique et biologique. On obtiendrait exactement le même résultat si le rayon ionisant tombait sur une des mémoires d'un de nos ordinateurs. Non seulement l'état physique de cette mémoire serait modifié, mais le programme faisant appel à cette mémoire, ainsi modifiée, serait lui-même modifié : soit rendu plus efficace (avec beaucoup de chance) soit plutôt affecté d'un bug entraînant des effets parasites ou même bloquants.

L'entropie informationnelle

Ceci conduit à réfléchir au concept d'entropie. Le changement d'état physique et informationnel d'une unité quelconque de l'univers entraîne des effets très importants au regard de "l'entropie énergétique et informationnelle" de ce dernier. C'est en particulier la thèse de Seth Lloyd. De même que l'on peut rapprocher l'état physique d'un élément de l'univers avec son état informationnel, on peut rapprocher l'état d'entropie énergétique de cet élément avec son état d'entropie informationnelle. L'énergie de l'univers, dans cette optique, mesurée par son niveau d'entropie est ce qui lui permet de faire telle ou telle chose. L'information est ce qui lui commande de faire telle ou telle chose. Dans ce cas, l'entropie informationnelle est l'information nécessaire pour analyser les mouvements au hasard des atomes et des molécules de l'univers. Comme ces mouvements sont trop petits pour être identifiés par nous, l'information les concernant nous est invisible. L'entropie informationnelle mesure notre ignorance relative à l'état de détail de ce système (ignorance qui n'était pas celle de l'imaginaire démon de Maxwell, qui savait tout sur l'état de toutes les molécules d'un gaz enfermé dans une enceinte).

La 2e loi de la thermodynamique, considérée de plus en plus comme universelle, au même titre que les lois fondamentales de la physique, et s'imposant donc à l'ensemble de l'univers, sinon à l'ensemble des univers, précise que l'entropie énergétique ne diminue jamais. Autrement dit, l'énergie inutilisable s'accroît sans cesse aux dépens de l'énergie utilisable. Il en est de même de l'information. L'essentiel de l'information intéressant un système physique (par exemple les positions relatives de chacun de ses atomes) nous est inconnue. Nous n'avons que des informations statistiques ou de probabilité à leur sujet. Nous pouvons préciser ces informations - sous réserve des limites imposées par la mécanique quantique et tenant au principe d'incertitude. Mais ceci exige alors une recherche d'information introduisant plus de désordre informationnel dans le système global que nous n'obtenons d'ordre permettant d'améliorer la précision de notre description.

Les hypothèses assimilant l'univers à un immense ordinateur se modifiant lui-même par des opérations à la fois physiques et informatiques sont donc nécessaires pour

comprendre l'évolution de l'univers à partir de son émergence initiale à partir du vide quantique. Avec un ordinateur classique, pour simuler l'univers ou un simple élément de celui-ci, il faudrait des quantités d'unités de calcul et de mémoire imposant le recours à un ordinateur aussi grand que l'univers lui-même, sinon davantage. Ce n'est plus le cas dans l'hypothèse selon laquelle l'univers serait lui-même un ordinateur quantique, que l'on pourrait qualifier d'ordinateur quantique universel.

D'une part ceci serait en accord avec les lois de la physique qui postulent l'existence d'un univers quantique sous-jacent à tous les univers possibles. D'autre part, la puissance de calcul de cet ordinateur aurait permis à l'univers initial de se construire bien plus rapidement qu'avec des processus physico-chimiques ordinaires. Ceci parce qu'il pourrait réaliser des calculs superposés à partir des bits quantiques ou q.bits propres qui le composent.

Autrement dit, dans cette hypothèse, l'univers n'a pu apparaître et se développer qu'en se servant à lui-même d'ordinateur quantique. De la même façon, notre organisme ne peut croître et se protéger des agressions qu'en utilisant ses propres capacités computationnelles. Si l'univers n'avait pas été un ordinateur quantique, il n'aurait pas pu acquérir dans les 14 milliards d'années de sa vie supposée, la complexité que nous lui connaissons aujourd'hui. En effet, les toutes premières informations reçues par l'univers à sa naissance, si elles avaient été traitées de façon linéaire par un ordinateur séquentiel, n'auraient pas permis d'explorer en temps utiles les multiples branches d'opportunités nécessaires à ce que soient dégagées les solutions les plus viables à la survie de l'univers sous la forme que nous lui connaissons aujourd'hui, depuis la création des galaxies jusqu'à celle de la vie et de l'intelligence sur notre Terre. L'univers se serait développé de façon linéaire, sans doute très monotone. Il aurait ressemblé à un lac sans vent.

Les calculs en superposition

Au contraire, la multiplication des calculs en superposition a permis à l'univers naissant d'explorer toutes les possibilités d'évolution en parallèle. Certes, toutes les hypothèses n'ont pas été matérialisées. Seules certaines ont été retenues. Mais par qui et de quelle façon ? Elles l'ont été par l'interaction entre les bits quantiques et les bits matériels résultant des premières opérations logiques de type ET, OU, NON, COPIE réalisées initialement. Cette interaction «matérialisante» résulte du phénomène désormais admis par les physiciens quantiques, dit de la décohérence. En termes plus classiques, on parle de la réduction de la fonction d'onde d'un système quantique suite à la mesure réalisée par un observateur macroscopique.

Prenons l'exemple d'une des toutes premières opérations réalisées par l'univers dès sa naissance (soit approximativement 10^{-44} secondes en temps de Planck). Il s'agit de la façon dont des instabilités dans la répartition de l'énergie initiale sont apparues à la suite des fluctuations quantiques des niveaux d'énergies. Si l'on considère ces fluctuations comme des opérations informatiques, explorer leurs conséquences aurait

pris beaucoup trop de temps à un ordinateur digital, au rythme imposé par l'inflation. L'univers serait resté homogène. Leur exploration en parallèle par un ordinateur quantique a permis de faire apparaître de nombreux types de répartition de la densité énergétique. Un multivers aux innombrables branches a été esquissé.

Mais le propre de l'ordinateur quantique est de décohérer dès que l'on veut connaître le résultat de ses calculs. En l'espèce, comme il n'y avait pas à l'époque d'observateur macroscopique capable d'interagir avec les calculs de l'ordinateur quantique universel, c'est un simple hasard qui a entraîné le choix d'un embranchement parmi les multiples histoires virtuellement possibles. C'est ce hasard qui a produit les inégalités dans la densité de matière énergie du cosmos initial, détectées par la sonde Planck.

De proche en proche, ces premiers choix ont entraîné des décohérences en chaînes portant sur les innombrables calculs quantiques que continuait à faire l'ordinateur quantique universel. L'univers tel que nous le connaissons en a résulté. Chaque fois qu'un q.bit de l'ordinateur quantique universel proposait un grand nombre, sinon une infinité de choix, l'interaction avec la matière déjà créée obligeait l'univers à choisir une solution et une seule. Mais ceci ne veut pas dire que l'« histoire » ainsi écrite était obligée de redevenir linéaire. Les fluctuations propres à la physique quantique introduisaient en permanence des éléments générateurs de diversité, dont certaines mutations génétiques donnent un exemple en biologie.

Au fur et à mesure de la progression de l'ordinateur quantique universel dans la construction de complexifications reposant sur des processus d'acquisition de négentropie, énergétique et informationnelle, notre univers approfondit et diversifie la route initialement choisie par hasard et conduisant, sur Terre tout au moins, à l'apparition de la vie et de la conscience. Il n'y a cependant pas de marche obligée vers plus de vie et de conscience, car des accidents dus à des fluctuations quantiques peuvent toujours se produire. Mais chaque jour qui passe renforce la cohérence globale des solutions adoptées par notre univers, dont bénéficient la vie et la conscience.

Ajoutons que, si l'on admet qu'à partir du vide quantique peuvent apparaître en permanence de nouvelles « bulles » d'univers, et que celles-ci se comportent également comme des ordinateurs quantiques, on peut comprendre la diversité de ces univers. Il n'y a aucune raison pour que les chaînes de décohérences aléatoires initiales respectent un processus identique. Rien en principe n'obligerait par ailleurs ces univers à construire des lois fondamentales identiques.

On voit que, dans l'hypothèse – très vraisemblable et qui pourra être démontrée demain avec le progrès des ordinateurs quantiques – selon laquelle l'univers se comporterait comme un calculateur quantique universel, resterait entière la question posée par l'existence du vide quantique. Cette entité n'intervient pas seulement à l'origine des bulles d'univers, mais à tous moments de la physique régnant dans notre propre univers. Nous l'avons rappelé plus haut. Où va la matière disparaissant, excepté le rayonnement de Hawking, dans un trou noir. Dans quel milieu circule, avec une vitesse instantanée, l'information permettant à deux particules intriquées de

demeurer sensible à l' « observation » que subit l'une d'entre elles, fussent-elles séparées par des distances cosmologiques? Plus généralement d'où provient ce milieu sans temps et sans espace que toute la physique quantique actuelle oblige à considérer comme « réel »? La science d'aujourd'hui est obligée de reconnaître son ignorance. Ceci permet aux mythologies créationnistes de proliférer. Mais le matérialiste préfère dire « pour le moment, je ne sais pas » que faire appel à l'hypothèse d'un Dieu omniscient.

4.2. L'hypothèse des multivers

Les développements récents de la cosmologie quantique proposent deux concepts jugés généralement relever de la philosophie la plus spéculative. Le premier est celui du multivers, selon lequel la notion d'univers multiples constitue la seule façon scientifique de se représenter notre univers et sa place dans un environnement cosmologique plus large dont il ferait partie. Le second est celui de l'univers mathématique. Tous les univers, dont le nôtre, exprimeraient des structures mathématiques fondamentales en dehors desquelles il n'y aurait pas de réalité profonde. Les deux concepts remontent souvent à l'Antiquité et se sont généralisés depuis un siècle, avec l'explosion de la physique moderne. Voyons d'abord celui du multivers.

Le multivers

Le cosmologiste Max Tegmark a récemment proposé une taxonomie qui devrait nous permettre d'organiser le zoo des univers parallèles imaginés par les promoteurs de ces hypothèses. Nous pouvons l'adopter ici. Elle permet de concilier des approches initialement très différentes.

Il faut d'abord prendre en considération un niveau I, le Multivers. L'idée est généralement acceptée par de nombreux cosmologistes. Elle découle de la théorie de l'inflation, qui aurait permis à l'univers initial né du Big Bang de s'étendre en un très court temps aux dimensions de l'univers visible aujourd'hui. La théorie de l'inflation permet d'interpréter les observations des satellites Wilkinson puis Planck portant sur le rayonnement micro-ondes du fond de ciel, dit fond diffus cosmologique. Ce rayonnement est désormais considéré comme le témoin, non d'un problématique Big Bang, mais de l'univers extrêmement chaud et dense tel qu'il était lorsque, de plasma impenétrable il est devenu transparent, autrement dit lorsque, grâce à l'expansion, les photons de la lumière aient pu commencer à y circuler. Le fond diffus cosmologique fournirait donc une image de notre univers quelques 380 000 ans après sa naissance. Bien plus, il est aussi considéré par la plupart des scientifiques comme illustrant un événement initialement proposé par le physicien Alan Guth pour expliquer l'homogénéité observée de la distribution de la matière dans notre univers. Il s'agissait de l'"inflation" ou expansion très rapide du volume de l'univers (par un facteur de

1078 en un temps de 10^{-30} secondes).

L'inflation

Longtemps refusé par les cosmologistes, ce phénomène d'inflation est désormais généralement admis. Inutile de souligner qu'il est parfaitement invraisemblable au regard de ce que nous connaissons du monde terrestre. Il entraîne différentes conséquences qui sont scientifiquement observables et qui le rendent indispensable aux yeux de la plupart des théoriciens. Cette inflation, après s'être calmée pendant plusieurs milliards d'années, pourrait avoir repris récemment et être responsable de la nouvelle expansion de l'univers récemment observée, bien plus lente pour le moment que la première et que certains attribuent à une mystérieuse "énergie noire". Pour Tegmark, l'inflation, sous ses différentes formes, est inséparable de la structure profonde de l'univers.

Or des résultats récemment publiés semble avoir conforté l'hypothèse de l'inflation. Le radiotélescope dit BICEP2 (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization, version améliorée de BICEP, mis en service en novembre 2009), semble avoir vérifié l'existence des ondes gravitationnelles prédites par la théorie de la Relativité générale en 1915.

Ces ondes sont très faibles. La modification de distance qu'elles créent en courbant l'espace-temps sur Terre est de l'ordre de 10-18 mètre, c'est à dire un millième de la taille d'un noyau d'atome. Ces ondes sont assimilables à des oscillations de la courbure de l'espace-temps. Albert Einstein en avait prédit l'existence en 1918 en se basant sur sa théorie de la relativité générale. Elles sont produites par des masses accélérées. Mais ceci demande de très grandes masses et de très grandes accélérations, à des vitesses approchant celle de la lumière. On pourrait les nommer des tremblements de l'Espace-temps.

D'ores et déjà, certains physiciens pensaient avoir observé des sources d'ondes gravitationnelles dans des systèmes astrophysiques impliquant des objets massifs et très denses comme les étoiles à neutrons ou les trous noirs manifestant de grandes accélérations. Mais les détecteurs terrestres, notamment l'interféromètre franco-italien Virgo, n'ont pas encore produit d'observations concluantes. Il était donc raisonnable d'en suspecter la production à la suite du phénomène le plus violent aujourd'hui concevable, l'inflation ayant suivi le Big Bang. Les résultats produits par BICEP2 présentent donc une importance considérable, tant au plan théorique qu'observationnel. Ils devront cependant être confirmés par d'autres observations, provenant notamment du satellite européen Planck. Celui-ci analyse l'ensemble du ciel alors que BICEP2 en a étudié environ 1%.

L'observation de BICEP2 confirmerait très largement l'hypothèse d'Alan Guth, concernant l'inflation primordiale. Nous avons dans des articles précédents indiqué

que la plupart des cosmologistes, malgré beaucoup de réticences, avaient fini par admettre ce phénomène. Elle seule expliquerait les variations de densité résultant de l'observation du fond de ciel cosmologique, dont les plus récentes proviennent du satellite européen Planck. Selon Alan Guth, une fraction de seconde (vers 10-30 seconde) après le Big Bang, une courte mais extrêmement rapide phase d'inflation s'est déroulée. La taille de l'Univers a cru alors énormément, puisqu'il est passé d'un état condensé initial ayant émergé du vide cosmique, pour atteindre une taille dépassant largement celle de l'univers visible.

Quelques instants après l'inflation, les premiers protons se sont formés, donnant naissance ensuite aux premiers atomes de la matière aujourd'hui visible. L'inflation s'est très vite ralentie, mais selon l'hypothèse dite de l'inflation éternelle, elle continuerait à se faire sentir, entraînant une dilatation continue de l'espace-temps, qui éloignerait progressivement les galaxies et autres objets cosmologiques les uns des autres.

Durant cette phase extraordinairement violente de l'inflation initiale, des ondes gravitationnelles ont été émises. Les ondes générées dans l'Espace-temps primitif sont analogues à celles provoquées par un pavé tombant dans une mare. La matière, celle que nous connaissons, la matière ordinaire, et la matière noire supposée, dont la nature est encore inconnue mais qui serait cinq fois plus abondante que la matière ordinaire, aurait été agitée par deux types de mouvements dans cet univers primordial. Ceux provoqués par sa propre attraction sur elle-même, ce qui l'attire vers les régions de l'espace où des surdensités ont été générées par les fluctuations initiales. Mais aussi ceux qui proviennent du mouvement de l'espace-temps lui-même.

Elles sont provoquées par le couplage entre le champ responsable de l'inflation - un champ du même type que le champ définissant le vide quantique, dit champ de Higgs, doté d'une pression négative – et la gravitation et les interactions nucléaires (forte et faible) et électromagnétique découlant de l'apparition des deux sortes de matière.

La réception d'ondes gravitationnelles peut être polluée par l'émission des poussières de la Galaxie. BICEP-2 a été implanté en Antarctique, pour viser le pôle sud de la Galaxie, une direction où il y a beaucoup moins d'étoiles, de gaz et surtout de poussières qu'à son équateur. Il reste que des corrections sont nécessaires pour éliminer cet effet. Elles seront réalisées dans les prochains mois en utilisant les cartographies du fond de ciel entier déjà fournies ou à fournir par Planck. Il convient donc d'attendre un peu avant d'attribuer une valeur définitive aux observations de BICEP2.

Dans ce cas, l'hypothèse de l'inflation et de ses suites, 380.000 ans après, serait confirmée. Le mouvement provoqué par les ondes gravitationnelles aurait imprimé une polarisation dans la lumière, qui a pu s'exprimer lorsque les photons associés au plasma primordial ont été libérés lors de la formation des atomes. Jusqu'alors, ces photons, autrement dit la lumière, étaient englués dans la soupe de protons et

d'électrons qu'était le cosmos. La capture des électrons par les protons, permise par le refroidissement et la dilution de l'Univers a provoqué cette libération sous la forme du rayonnement cosmologique, étudié par Planck et BICEP-2.

L'observation de BICEP2 donne donc un crédit supplémentaire à la théorie de l'inflation. Elle pourrait même en être une détection directe. Elle va permettre également de faire un tri entre les nombreuses hypothèses suggérées par les théoriciens pour expliquer cette dernière. Inutile de souligner que tous ces travaux se placent, non seulement dans le cadre de la physique macroscopique, celle de Newton-Einstein, mais dans celui de la physique quantique. Ils permettront notamment de mieux préciser ce que pourrait être le champ de Higgs, assimilé par beaucoup au vide quantique, dépourvu de temps et d'espace, dont les fluctuations pourraient être à la source de la production des bulles d'univers dans l'hypothèse des multivers.

Il est inutile de souligner l'intérêt philosophique que présentent aussi de tels travaux. Mais en quoi cette question de l'inflation intéresse-t-elle l'hypothèse des multivers? La cosmologie n'est pas pauvre en observations qui sont contraires au sens commun mais qui s'expliquent par les lois générales de la physique. Ainsi en est-il des trous noirs, déjà évoqués. Il n'est plus possible aujourd'hui de pratiquer une cosmologie quelque peu sérieuse sans tenir pour réels de tels phénomènes, même s'ils sont impossibles à comprendre en profondeur. Il en est désormais ainsi de l'inflation. Pour les défenseurs de l'hypothèse du multivers, ce concept désigne un mécanisme qui n'est pas limité à l'histoire de notre univers, mais qui pourrait justifier l'hypothèse selon laquelle, dans un cosmos qui s'étend sans cesse, d'autres univers aient pu apparaître dont nous n'aurions pas connaissance, du fait qu'ils sont trop lointains pour que leur lumière ait pu nous parvenir. La création de notre univers et l'inflation en résultant seraient nées de fluctuations quantiques à partir du "vide quantique". Elle pourrait être éternelle. Rien de tout ceci n'est aberrant en termes de physique quantique.

Or la rapidité de l'inflation vécue par notre univers aurait pu créer des espaces analogues à celui-ci, avec les mêmes lois fondamentales, mais sans doute plus réduits, si loin qu'aucune lumière ne peut nous en parvenir. Il s'agirait donc d'autres univers.

Un deuxième niveau de Multivers, niveau II selon Tegmark, hypothèse proposée par le physicien Alexandre Vilenkin et d'autres, nous projette en dehors de notre univers et de son inflation. Il généralise à un cosmos plus étendu, peut-être infini, le concept d'inflation et même celui d'inflation éternelle. Celle-ci à son tour créerait des espaces ou univers s'éloignant du nôtre à des vitesses supérieures à celle de la lumière. Ils seraient donc radicalement inobservables, mais n'en seraient pas moins aussi réels que le nôtre. Leurs lois fondamentales pourraient être différentes des nôtres.

Vient ensuite, dans la taxonomie de Tegmark, le Niveau III de multivers. Il correspondrait à une hypothèse depuis longtemps proposée en mécanique quantique par le mathématicien Hugh Everett mais longtemps refusée, dite des mondes

multiples. Selon Everett, lorsqu'un observateur observe une entité quantique et résout sa fonction d'onde, il ne réduit pas cette entité à l'une seule des dimensions qu'elle possédait initialement en superposition. L'entité conserve ses deux états, mais l'observateur est dédoublé dans un univers parallèle où il retrouve l'état de l'entité qui existait avant l'observation en superposition avec l'état qu'il a observé.

Les physiciens quantiques ont du mal à admettre cette interprétation. Elle oblige en effet à accepter l'existence d'une infinité d'univers se générant en ramifications complexes, chacune comportant un double de l'observateur initial. Si l'on admet par ailleurs que les observateurs, humains ou autres sont infinis, et qu'il se crée une branche d'univers à chacune de leurs observations, l'on se retrouve dans une situation que certains n'hésitent pas à qualifier de complet délire, un nombre effectivement infini d'univers et d'observateurs dédoublés. Pour notre part, nous pensons que cette solution est une solution de facilité, évitant de rechercher d'autres interprétations plus "réalistes" à la question de la résolution de la fonction d'onde.

Les univers mathématiques

Le dernier ouvrage de (sir) Roger Penrose "*Les cycles du temps" une nouvelle vision de l'univers*", Odile Jacob 2014, envisage les univers multiples à partir d'une autre approche. L'auteur, mathématicien universellement reconnu, y présente son hypothèse dite de la Cosmologie Conforme Cyclique (CCC). Celle-ci vise à éclairer les points encore incompris de la cosmologie contemporaine, notamment l'avant-big bang, les trous noirs et la fin de l'univers lorsque celui-ci, au terme d'une expansion paraissant aujourd'hui généralement admise, ne sera plus représenté que par des atomes infiniment éloignés les uns des autres dans un espace lui-même infini. Mais la CCC que propose Penrose, si elle peut selon lui résoudre des difficultés inhérentes aux modèles cosmologiques actuels, nous plonge dans un mystère encore plus grand, celui comme son nom l'indique, d'un univers cyclique, se renouvelant sans cesse dans de nouveaux big bangs. L'univers cyclique est une très vieille idée, mais Penrose la reprend et la développe de façon notamment à la rendre compatible avec la gravitation quantique en cours d'élaboration par ailleurs.

Ce travail a nécessité de sa part une intense élaboration mathématique. Les quelques éléments qu'il en donne dans le livre sont pratiquement inaccessibles à un lecteur non au fait des structures mathématiques utilisées depuis maintenant plus de 150 ans par la communauté des cosmologistes théoriques pour soutenir leurs propres hypothèses sur l'univers. Se pose alors la vieille interrogation: pourquoi les mathématiques, dans leurs développements quasi exponentiels, peuvent-elles servir de support à ces hypothèses sur l'univers? Pourquoi sont-elles seules capables de le faire? Et devons-nous faire conscience à ces mathématiques pour représenter vraiment l'univers?

Max Tegmark, nous l'avons vu, rejoint ceux qui avant lui avaient postulé, non seulement que l'univers est parfaitement descriptible par les mathématiques - ce que

Penrose ne met aucunement en doute - mais qu'il est lui-même mathématique. Même si Penrose ne formule pas explicitement cette dernière hypothèse, son livre pourrait nous conduire, comme beaucoup d'ouvrage de cette nature, à nous demander pourquoi l'univers, y compris l'ensemble des phénomènes étudiés par la science, prennent-ils si facilement des formes mathématiques. Ne serait-ce pas qu'auraient existé, ou existeraient, des structures mathématiques primordiales, hors de l'espace et du temps, qui, si l'on peut dire, s'incarneraient dans l'univers, comme l'embryon s'est incarné dans l'enfant.

Tegmark va jusqu'au bout du postulat. Pour lui, la réalité n'est pas seulement descriptible en termes mathématiques – ce que personne ne conteste, du moins en principe. Il affirme que la réalité est mathématique et n'est pas autre chose. Il s'agit donc d'un niveau IV de multivers, les univers mathématiques. Ceux-ci, comme les précédents, seraient très nombreux, voire indénombrables. Depuis l'antiquité, les observateurs se sont toujours étonnés de voir les mathématiques si bien décrire le monde physique. C'est la question qu'avait formulée en 1960, le physicien Eugène Wigner dans un célèbre article : *"La déraisonnable efficacité des mathématiques"*... Il posait le problème, mais ne l'expliquait pas en profondeur. Il est exact que, depuis la préhistoire, les physiciens n'ont pas cessé de découvrir dans la nature des formes, des patterns et des régularités qui peuvent être décrites par des équations mathématiques.

Par ailleurs, le tissu même de la réalité physique contient des douzaines de nombres pures à partir desquelles toutes les constantes observées peuvent en principe être calculées. Certaines entités physiques telles que l'espace vide, les particules élémentaires ou la fonction d'onde, semblent purement mathématiques, en ce sens que leurs propriétés intrinsèques sont des propriétés mathématiques. Ceci permet de formuler l'hypothèse d'une réalité physique complètement indépendante des humains. En utilisant une définition assez large des mathématiques, on pourrait en déduire que le monde physique n'est pas seulement descriptible par les mathématiques mais qu'il est mathématique. Les humains seraient dans ce cas des composantes conscientes d'un gigantesque objet mathématique.

Une structure mathématique est un ensemble abstrait d'entités reliées entre elles par des "relations". Elle n'a pas de propriétés autres que ces relations. Par contre, elle peut avoir à l'intérieur de cet ensemble des caractéristiques intéressantes, telles que des symétries. Mais ces entités et ces relations n'ont pas de propriétés intrinsèques. Il en résulte que la nature ne peut pas être expliquée en recherchant jusqu'à l'infini les propriétés de ses composantes ultimes, mais seulement les relations entre ces composantes.

Le monde physique serait donc un objet mathématique que nous identifions et construisons petit à petit. Nos théories physiques sont des approximations réussies, car les structures mathématiques qu'elles utilisent sont de bonnes approximations de structures mathématiques complexes. Dans ce cas, l'efficacité des mathématiques n'est plus mystérieuse: les objets mathématiques que nous employons pour

comprendre le comportement de l'univers deviennent de plus en plus efficaces parce qu'ils sont de plus en plus proches de ce que l'Univers est vraiment.

Beaucoup de mathématiciens réputés se refusent à croire que les mathématiques qu'ils explorent sont de simples créations de leur cerveau. Pour eux, il s'agit de réalités extérieures qu'ils découvrent comme un navigateur découvre des îles jusque là inconnues. Cette conception est dite platonicienne car elle rejoint les images proposées par Platon avec l'allégorie de la caverne. Le mathématicien français Alain Connes s'est rallié à ce point de vue.

Or, pour en revenir aux multivers, une telle conception des mathématiques conduit directement au multivers de Niveau IV de Tegmark. Celui-ci croit pouvoir postuler que les mathématiques de notre univers ne constituent qu'une structure mathématique parmi une infinité d'autres structures concevables, celles correspondant notamment (mais pas exclusivement) aux mathématiques inventées par les mathématiciens théoriciens dans un travail de découverte ou de construction qui ne cesse de s'étendre. Or si notre structure mathématique d'ensemble constitue un univers, le nôtre, pourquoi les autres structures ne correspondraient-elles pas à d'autres univers? Tegmark peut alors faire l'hypothèse que toutes les structures mathématiques imaginables existent physiquement sous la forme d'univers parallèles.

La physique quantique pose directement la question de l'existence des structures mathématiques correspondant à ce qu'elle appelle les particules élémentaires, la fonction d'onde ou le vide quantique. Existe-t-il de telles entités dans la nature, susceptibles d'être identifiées et observées comme une table ou des chaises. Certainement pas. Il s'agit seulement de relations mathématiques entre éléments de la nature. Il n'est pas possible de visualiser l'espace immédiat inséparable de notre univers quotidien, sous ses divers aspects, univers newtonien, univers einsteinien ou univers quantique. Il faut recourir à des modèles mathématiques, espace euclidien, de Minkowski ou de Hilbert.

De même, il n'est pas possible de visualiser des particules élémentaires, quelles que soient leurs noms, contrairement ce que pense le grand public. Il n'existe que des relations mathématiques entre éléments microscopiques de la nature. Ainsi personne ne verra jamais, enfermé dans une éprouvette, le fameux boson de Higgs. On ne verra pas davantage le « champ de Higgs » qui donne leur masse aux particules décrites par le modèle standard. Si ces relations étaient différentes, l'univers tel que nous le connaissons serait différent. Enfin la fonction d'onde, sans doute encore plus abstraite, ne peut pas davantage être visualisée. Certains théoriciens se sont demandé si elle ne vivait pas comme un être autonome, quasiment observable, au sein d'espaces de Hilbert. La réponse est évidemment négative. Cependant les relations mathématiques entre les éléments visés par la fonction d'onde sont indispensables à la définition de tous les objets microscopiques et macroscopiques qui caractérisent notre univers.

Des fonctions nouvelles sont constamment découvertes et étudiées par les mathématiciens. S'agit-il de créations de leur cerveau? Ces fonctions existaient-elles

auparavant? Pourquoi alors, en ce cas, ne pas les attribuer à des univers qui se révéleraient à l'homme, mais existeraient indépendamment de lui. Comme rien ne permet de fixer de limites au travail de découverte des mathématiciens, rien ne permettrait en conséquence de fixer de limites au nombre de ces univers. La plupart de ces univers, sinon la totalité d'entre eux, relèverait alors de la cosmologie quantique théorique.

Un cerveau mathématique

Avant de faire l'hypothèse, impossible à démontrer, selon laquelle existeraient des univers mathématiques extérieurs à l'homme, il serait sans doute plus pertinent d'interroger sur le rôle de notre cerveau dans la production des concepts et structures mathématiques. On pourrait imaginer qu'il s'agit de produits du cerveau et plus généralement de l'organisme vivant, élaborés au cours de l'évolution pour faciliter l'adaptation à un monde dont la complexité paraissait initialement impénétrable. Mais la vie a évolué dans un environnement bien particulier, les milieux terrestres chauds et humides. Pourquoi penser que les outils mathématiques ayant eux-mêmes été produits et ayant évolué en auxiliaires de l'adaptation à ces milieux pourraient aujourd'hui nous servir à nous représenter les milieux cosmologiques?

Nous pourrions poser la question autrement. Ne serait-ce pas notre cerveau qui serait mathématique, et non l'univers profond, encore très largement invisible, dans lequel nous sommes plongés? Autrement dit, nos cerveaux et plus largement nos organismes, ayant développé au cours de leur évolution tout au long de l'histoire du monde animal des outils leur permettant au mieux d'analyser un monde dangereux afin d'y survivre, n'auraient-ils pas projeté ces outils sur le monde non immédiat, celui du cosmos supposé, afin de bénéficier de leur force explicative? L'expérience ayant été satisfaisante, les outils et les modèles du monde qu'ils permettaient se seraient co-développés par la suite.

Personne ne conteste aujourd'hui, même les mathématiciens les plus convaincus du caractère platonicien des mathématiques, le rôle de notre cerveau dans la production des mathématiques élémentaires, arithmétique, géométrie, les plus nécessaires à la survie et d'ailleurs utilisées de façon implicite par tous, mathématiciens ou non. Ce seraient des structures neuronales, aujourd'hui de mieux en mieux connues, qui associées à des structures anatomiques acquises par ailleurs, auraient élaboré l'aptitude à traiter mathématiquement les informations sensorielles basiques provenant de l'environnement.

Ces structures relèvent essentiellement du cortex associatif. Celui-ci, plus développé chez l'homme que chez les autres animaux (dont cependant ces derniers ne sont pas totalement dépourvus), permet de mettre en relations les contenus symboliques apportés par les sens. Par contenus symboliques, nous désignons en ce cas les traces que laissent en mémoire les expériences quotidiennes. Si je me brûle au contact du feu, mes sens laissent dans mon cerveau, au moins dans les zones spécialisées du

cerveau, une sensation de douleur. Elle sera sans doute rappelée à la vue d'un autre feu (comme chez l'animal) et m'imposera une conduite d'évitement. Mais le cerveau associatif me permettra de mettre en relation cette information avec celle que pourrait provoquer en moi la vue d'un feu destiné à cuire des aliments. Dans ce cas, il inventera le concept abstrait de feu et procédera à un calcul simple me permettant de comparer les avantages et les risques présentés par tel ou tel type de feu, afin d'en déduire des conduites correspondantes. Nous simplifions évidemment beaucoup.

L'apport spécifique des mathématiques consiste à combiner des concepts élémentaires au sein de règles conceptuelles permettant de construire des modèles de plus en plus audacieux (complexes) du monde, et de procéder sur ces modèles à des expériences simulées qui seront ensuite testées dans la réalité. Mais le risque, au moins en ce qui concerne l'adaptation au monde réel, consiste à étendre « ce qui a marché » à des domaines, non seulement nouveaux, mais échappant à toute vérification expérimentale. . Le cortex en ce cas accumule les associations symboliques les unes sur les autres, d'une façon qui peut être harmonieuse, mais qui décroche de la réalité – sauf évidemment à ce que certaines de ces associations suscitent des comportements qui, de symboliques initialement, se révéleront finalement efficaces dans la vie réelle.

Chez l'homme, d'abord intuitive, la construction de représentations géométriques du monde aurait été rationalisée, avec le succès que l'on connaît, au sein des premières civilisations bâtisseuses. Il en aurait été de même de l'arithmétique. Les neurosciences animales semblent montrer que la plupart des oiseaux et des mammifères sont capables de compter au moins jusqu'à trois, et de différencier les grands groupes des petits groupes. Ceci leur est vital pour la survie. Quant au concept d'infini, si étrange en cosmologie moderne, n'aurait-il pas été inventé spontanément par les cerveaux pour se représenter intuitivement ce qu'il y avait au delà de l'horizon visible. Très tôt ce concept a été repris explicitement par les mythes religieux (c'est-à-dire par des cerveaux humains en proie à certains stimulants chimiques favorisant les visions mystiques) pour désigner une déité omnisciente mais inconnaissable.

En élargissant l'approche, nous pourrions donc suggérer que les mathématiques évoluées qu'utilisent les physiciens n'existeraient pas en dehors des planètes abritant des êtres vivants. Elles ne seraient pas assez puissantes pour réguler l'évolution globale du cosmos, ni des structures que nous croyons pouvoir identifier au sein d'un cosmos indifférencié. Elles ne pourraient donc pas être attribuées à des univers et entités cosmologiques existant en dehors de l'homme, et que celui-ci se donnerait la mission de redécouvrir. Elles ne pourraient même pas être utilisées pour analyser ou interpréter les données brutes que nous apportent des instruments d'observation de plus en plus perfectionnés.

On dira qu'un tel jugement méconnaîtrait complètement le rôle des mathématiques en astronomie et en cosmologie. Elles servent d'abord à formuler des hypothèses sur l'univers à partir de données existantes. Celles-ci sont ensuite, comme en toute science, soumises à l'expérience instrumentale. Seules les hypothèses confirmées par cette dernière sont conservées, ainsi que les structures mathématiques ayant servi de

support à la formulation de ces hypothèses.

Malheureusement, si l'on peut dire, les hypothèses de l'astronomie et de la physique modernes, soutenues par des mathématiques de plus en plus sophistiquées, sont pour l'essentiel invérifiables par l'observation. Autrement dit, conformément à la logique scientifique ordinaire, elles devraient être abandonnées, ou tout au moins mises de côté en attendant des temps meilleurs. Il devrait en être ainsi du big bang, des trous noirs ou de la matière noire. Ceci ne se produit pas en général, car les cosmologistes physiciens proposent sans cesse de nouveaux éléments observables pouvant servir à justifier les théories inobservables qu'ils élaborent.

Il en est ainsi de l'observation du fond de ciel cosmologique pouvant éclairer, non le big bang mais l'univers tel qu'il était quelques temps après. Il en est de même du rayonnement des trous noirs ou de l'interprétation des images galactiques montrant que les galaxies, hors de l'hypothétique matière noire, ne disposeraient pas de masse suffisante pour survivre en tant que telles. Ainsi, de proche en proche, les présomptions se développent, les observations s'entrecroisent et un panorama général intéressant l'univers et son histoire semble pouvoir se dégager.

Mais faut-il aller plus loin, et prétendre utiliser les outils mathématiques élaborés à cette occasion pour formuler des théories fort belles au plan de l'élaboration mathématique, mais risquant de demeurer très longtemps invérifiables faute d'observation possible. D'ores et déjà, les hypothèses sur l'origine immédiate de l'univers (le big bang) et sur les événements ayant immédiatement suivi, sont difficiles à vérifier, même de façon indirecte. Aussi bien ne font-elles pas l'objet de consensus. Il en est de même, à un moindre degré, du concept d'inflation cosmologique initiale, admis dorénavant sans difficulté par la plupart des cosmologistes mais sérieusement mis en doute par Penrose et d'autres. Ne mentionnons même pas la théorie des cordes.

On dira que la science a toujours procédé ainsi: partir du moins hypothétique vers le plus hypothétique et accumuler ce faisant le maximum d'observations susceptibles de préciser le modèle d'ensemble, tout en réduisant le plus possible le champ des débats possibles entre scientifiques. Si Giordano Bruno et Galilée n'avaient pas imaginé la pluralité des mondes, nous en serions restés à la connaissance du cosmos élaborée par les pasteurs chaldéens.

Jusqu'où cependant s'arrêter dans le processus consistant à imaginer puis rationaliser mathématiquement des éléments d'univers, voire des univers eux-mêmes, qui risqueront de rester longtemps, sinon à jamais, inobservables.

Le problème que nous évoquons, celui de l'opportunité de présenter des hypothèses pratiquement invérifiables, ne se limite pas à la cosmologie traditionnelle. Celle-ci s'intéressait et s'intéresse encore à des événements et objets de grande taille, dits macroscopiques. Or la physique, depuis les années 1930, nous l'avons rappelé dans les sections précédentes, a été bouleversée par les acquis de la mécanique quantique. La cosmologie ne pouvait pas ne pas en tenir compte. Malheureusement l'approche microscopique de l'univers, découlant de ce que nous pourrions appeler une cosmologie quantique, suscite de nouvelles hypothèses invérifiables s'ajoutant à

celles de la cosmologie traditionnelle.

Certes, certaines hypothèses vérifiables peuvent en être déduites. C'est le cas notamment de celles intéressant la physique des particules de hautes énergies. Des instruments très puissants tels que le Large Hadron Collider européen permettent entre autres problématiques de simuler des états très chauds de l'univers, liés au big bang ou à des explosions de supernovae, à défaut de simuler l'univers primitif ou le milieu cosmologique dans son entier. Mais la physique des particules tient autant de la physique macroscopique que de la physique quantique.

Aujourd'hui d'autres domaines de la cosmologie ne peuvent échapper aux interprétations devenues aujourd'hui quasiment classiques de la mécanique quantique. Les interprétations les plus connues de cette dernière sont couramment évoquées. Il s'agit de celles concernant les problèmes de la superposition des observables quantiques, de leur intrication et plus généralement le vaste problème dit de la mesure faisant appel à la fonction d'onde et aux inégalités d'Heisenberg. Les emprunts à la mécanique quantique ont ouvert de nouvelles pistes précieuses en cosmologie, mais elles n'ont pas réduit, si on peut dire, les incertitudes.

L'exemple le plus souvent cité est ce qu'il advient d'une particule quantique lorsqu'elle est observée, autrement dit lorsque sa fonction d'onde se trouve « réduite ». Le principe d'indétermination veut que dans ce cas, l'on ne puisse observer simultanément les deux propriétés de la particule, position et impulsion, mais seulement l'une d'entre elles. L'autre disparaît dans on ne sait quel univers. Nous avons vu que Tegmark a fait sienne l'interprétation proposée par Hugh Everett, selon laquelle au moment de l'observation, l'univers de l'observateur, et celui par extension de la particule, se divisent en deux. On retrouve dans chacun de ces univers l'une ou l'autre des propriétés de la particule, mais il n'est plus possible de les réunir à nouveau. Cette conception acrobatique du multivers quantique est généralement refusée. Mais le problème reste entier.

La conceptualisation relativisée

Par ailleurs, la physique quantique véhicule avec elle un questionnement épistémologique que l'on rencontre certes dans toutes les sciences macroscopiques, mais qui se pose pleinement selon nous en cosmologie, qu'il s'agisse de la cosmologie microscopique, celle des particules, ou de la cosmologie aux grandes échelles. Il s'agit, comme l'a bien formulé la physicienne Mioara Mugur-Schachter, de ce que cette dernière a nommé Conceptualisation Relativisée. On pourrait aussi parler d'« hypothèse constructiviste ». Rappelons que pour de telles hypothèses, il n'existe pas de « réel en soi », ce que l'on appelait jadis le Réel des essences. ou réel platonicien, qui existerait en dehors de toute observation. Il n'y a de réel que relatif. On ne peut parler de réalité dans cette conception qu'en conjuguant l'observation d'un réel sous-jacent par un observateur bien défini doté lui-même d'instruments bien définis. Leur conjugaison donne généralement lieu à des résultats plus ou moins différents. Si ceux-ci sont exploitables en termes statistiques, ils ne peuvent prétendre caractériser avec

précision une quelconque réalité existant en dehors d'un observateur.

Il s'agit d'une interprétation épistémologique-philosophique de la mécanique quantique. Or si cette interprétation nous paraît s'imposer dans tous les domaines scientifiques, elle est encore refusée par beaucoup de chercheurs, en quelque discipline que ce soit, sauf peut-être dans les sciences sociales. Ceux qui la refusent ne veulent pas entrer dans un débat philosophique sur la Réalité. Par conséquent ils préfèrent s'en tenir au réalisme classique. Or ce refus est particulièrement répandu dans le monde de l'astronomie et de la cosmologie. Le réalisme paraît s'imposer de toute évidence. Pourrait-on imaginer, avait dit Einstein, que la planète Mercure n'existe que lorsqu'elle est observée.

Il faut bien voir cependant que les applications de la physique quantique à la cosmologie, poussées aux limites, provoquent des résultats surprenants, voire inacceptables, tant par le sens commun que par la communauté scientifique traditionaliste. On pourrait postuler qu'en dessous de l'univers visible existe un univers profond inobservable, une sorte de continuum sans formes ni limites identifiables a priori, mais qui pourrait faire émerger en permanence des univers ou bulles d'univers, observables dans certaines conditions, continuum doté de capacités de création ou de transformation infinies. Il pourrait s'agir d'une transposition à la cosmologie du concept de monde infra-quantique utilisé parfois par la mécanique quantique. Rappelons que dans cette acception, le monde infra-quantique est un espace infini, hors du temps et de l'espace tels que définis par la physique macroscopique, où se déroulent des phénomènes non directement observables, ainsi la superposition ou l'intrication des particules.

L'univers profond pourrait ne pas être différent. On le retrouverait à la source de toutes les entités cosmologiques observables, qu'il s'agisse de notre Terre, d'autres planètes ou de l'ensemble du cosmos, tant vers l'infiniment grand que vers l'infiniment petit. Ses manifestations pourraient par contre être observées par les êtres vivants que nous sommes, à partir d'hypothèses qu'ils élaboreraient et qu'ils vérifieraient, le tout grâce à des instruments de plus en plus performants. Les humains seraient donc de plus en plus dans un rôle d'observateurs tels que définis par la physique quantique. Ils inventeraient des hypothèses sur le cosmos de plus en plus audacieuses et s'efforceraient de vérifier la cohérence de ces hypothèses avec ce qu'ils ont précédemment construit sur Terre grâce à leurs outils neurologiques et sensoriels du moment. Ainsi pourraient-ils élaborer des modèles de plus en plus détaillés décrivant les entités cosmologiques auxquelles nous sommes habitués, planètes, soleil, univers proche, champs d'énergie, etc.

Mais qu'en serait-il alors de la véracité de ces modèles, autrement dit renverraient-ils à des objets réels, observables directement? En posant la question autrement, quelles « réalités » seraient sous-jacentes à l'univers que nous observons. La planète Mercure précédemment citée serait-elle seulement une création des cosmologistes? Dans la perspective évoquée ici, son statut au regard d'un univers profond ne serait pas très différent de celui d'une particule au regard du monde infra-quantique. En mécanique quantique, rappelons-le, une particule n'existe pas en soi, non plus d'ailleurs qu'un

onde à laquelle on l'assimile généralement. N'existent seulement que des agrégats statistiques résultant d'un grand nombre d'observations. Mais ces agrégats, convenablement manipulés avec les instruments de la physique macroscopique, ont permis de construire toutes les technologies électroniques modernes.

Dès ce moment, il n'est plus nécessaire de s'interroger sur la supposée réalité en soi de la supposée particule. Il suffirait de lui attribuer une réalité relative, autrement le produit d'une conceptualisation relativisée telle que définie par Mioara Mugur Schachter. Les humains eux-mêmes, dans cette perspective, tels qu'ils croient se décrire à partir d'observations sensorielles coordonnées par leur cerveau (voir le Chapitre Le cerveau dans la site de cet essai) ne seraient ils pas également le produit d'une conceptualisation relativisée. Ceci ne retirerait rien à leurs capacités d'être humains au sein d'un univers qui comme eux n'existerait que comme une réalité relativisée.

Pourrait-on pousser ce raisonnement à l'extrême, en imaginant que ce que les cosmologistes appellent l'univers visible, c'est-à-dire l'ensemble des galaxies dont la lumière a eu le temps de nous parvenir, auxquelles il faudrait ajouter la "matière noire", ne serait qu'une création de nos cerveaux, assistés par des instruments d'observation de plus en plus performants ? La seule réalité sous-jacente serait dans ce cas celle de l'infra-univers indescriptible en soi tel qu'évoqué plus haut (le vide quantique dépourvu de temps et d'espace ?) Ceci ne nous empêcherait en rien d'agir, en tant que réalités relativisées, au sein d'un cosmos peuplé lui-même d'entités relativisées. Autrement dit, cela ne devrait pas nous empêcher d'envoyer des sondes vers la planète Mercure, telle que nous l'observons et la conceptualisons avec les instruments du moment. La modélisation que nous en sommes donnée, autrement dit sa réalité relativisée, ne pourrait qu'y gagner en précision.

Mais si nous considérons que Mercure est faite d'un très grand nombre de particules ne pouvant échapper au statut que leur confère la mécanique quantique, c'est-à-dire celui de q .bits, nous devrions aussi, si les outils mathématiques étaient disponibles, la considérer comme une *q.planète*, susceptible de superposition ou d'intrication.

Le raisonnement suivi jusqu'ici nous conduit à l'hypothèse développée par Seth Lloyd et présentée plus haut, selon laquelle l'univers serait un immense calculateur quantique, que nous pourrions modéliser au mieux en utilisant les futurs calculateurs quantiques. Encore faudrait-il que les mathématiques utilisées pour la conception des logiciels requis dans les calculateurs quantiques fassent d'importants progrès. Quoi qu'il en soit, on voit que l'hypothèse de Seth Lloyd peut être considérée comme une version renouvelée de celle évoquée plus haut selon laquelle l'univers serait intrinsèquement mathématique. Un continuum commun

L'une des conséquences intéressantes découlant d'une extension de la mécanique quantique à la cosmologie serait qu'il n'y aurait pas de différence entre l'univers infra-physique profond évoqué précédemment, à partir duquel émergeraient des univers matériels proches ou non du nôtre, et l'infra-univers quantique supposé exister à la source des phénomènes quantiques observables. On assimile quelquefois ce dernier à ce que les physiciens nomment le vide quantique, précédemment mentionné. Il ne

s'agit pas d'un vide mais d'un "continuum" plein de particules virtuelles hautement énergétique, dont les "fluctuations" donneraient naissance à la matière quantique telle que nous pouvons l'observer. Le vide quantique n'est pas un mythe, même s'il n'est pas directement mesurable. Beaucoup d'observations permettent de le considérer comme une "réalité", réalité relativisée pour reprendre la terminologie présentée plus haut.

Mais dans ce cas pourquoi ne pas considérer que ce vide quantique serait le même qu'un « vide » cosmologique correspondant à l'infra-cosmos évoqué plus haut, dont les fluctuations donneraient naissance à des bulles d'univers ou bébés-univers se développant ou non en univers semblables ou non aux nôtres, lesquels pourraient théoriquement apparaître à l'infini ? Dans cette hypothèse, celle d'un infra-cosmos ou vide cosmologique qui serait à la source de toutes les structures cosmologiques observées, on pourrait se demander quelle énergie provoquerait les fluctuations donnant naissance à des bulles d'univers. Supposer que le vide cosmologique serait totalement passif et inerte ne serait pas défendable. Il devrait, bien que vide, être animé d'une énergie à la source de l'émergence des bulles d'univers.

Dans ce cas, ne serait-ce pas une énergie assimilable à l'énergie du vide quantique. Plus exactement encore, le vide cosmologique et le vide quantique ne formeraient-ils pas une seule et même entité, dont les fluctuations donneraient naissance, selon qu'elles seraient "observées" ou non, à des particules quantiques ou à des particules matérielles. Cette hypothèse est désormais admise par les théoriciens du multivers.

Dans notre univers et plus précisément sur notre Terre, les observateurs seraient des humains, c'est-à-dire des créatures biologiques ayant résulté de l'évolution du monde quantique. Mais sur d'autres astres, voire sur notre Terre elle-même, pourraient se trouver des observateurs différents de nous. Ils pourraient vraisemblablement se donner des modèles du cosmos différents du nôtre. Ainsi, si ces observateurs disposaient d'instruments observant directement les champs d'ondes électromagnétiques ou d'ondes gravitationnelles, leur modèle de l'univers serait, au moins dans l'apparence, différent du nôtre. Il ressemblerait plus à nos cartes météorologiques matérialisant les isobares qu'à nos présentes cartes de l'univers visible. Les astres y seraient identifiés comme nous le faisons des dépressions et des anticyclones, sous la forme de centres d'actions aux limites imprécises.

Dans ces conditions, pourquoi refuser les hypothèses concernant les multivers, qu'elles que soient les formes adoptées ? Nous avons rappelé plus haut que si Giordano Bruno et Galilée n'avaient pas imaginé la pluralité des mondes, nous en serions restés à la connaissance du cosmos élaborée par les pasteurs chaldéens.

Les humains ne risqueraient donc rien, aujourd'hui, à parier sur la pluralité des univers. Des conséquences intéressantes et utiles, inimaginables aujourd'hui, pourraient en découler. D'ores et déjà ceux qui se sont persuadés de la « réalité » des multivers ne sont-ils pas d'une certaine façon des « hommes augmentés », comparés à ceux qui se complaisent à ne rien imaginer ?

4.3. L'hypothèse des cerveaux de Boltzmann

Ce terme évoque un curieux problème, qui ne semble intéresser que quelques rares cosmologistes théoriciens du multivers, tels Don Page et Andrei Linde. Il s'agit d'une hypothèse selon laquelle les fluctuations de l'énergie du vide pourraient faire apparaître de façon aléatoire des « observateurs » dits Boltzmann Brains, lesquels pourraient venir en concurrence avec les observateurs humains dans l'observation de l'univers. Il ne s'agirait évidemment pas de cerveaux biologiques qui circuleraient dans l'univers mais plutôt d'algorithmes intelligents capables de prises autonomes de décision, comme il commence à en apparaître sur Terre (Voir notre chapitre La société numérique)

Le concept de cerveau de Boltzmann, dénommé aussi paradoxe du cerveau de Boltzmann (qu'il ne faut pas confondre avec le concept de machine de Boltzmann désignant un certain type de réseaux de neurones) a été développé récemment à partir d'une intuition déjà ancienne due à Ludwig Boltzmann (1844-1906). Un cerveau de Boltzmann serait une entité consciente née d'une fluctuation aléatoire provenant d'un état fondamental de chaos thermique. Boltzmann ne connaissait évidemment pas la physique quantique. Mais il avait cherché à comprendre pourquoi nous observons un haut degré d'organisation dans l'univers (ou bas niveau d'entropie) alors que la seconde loi de la thermodynamique professe que l'entropie devrait augmenter sans cesse. Dans ce cas, l'état le plus probable de l'univers devrait être proche de l'uniformité, dépourvu d'ordre et présentant par conséquent une entropie élevée.

Boltzmann avait formulé l'hypothèse selon laquelle nous-mêmes et notre univers, nous serions les résultats de fluctuations se produisant au hasard au sein d'un univers à entropie élevée. Même au sein d'un état proche de l'équilibre, on ne peut exclure de telles fluctuations dans le niveau de l'entropie. Les plus fréquentes seraient relativement petites et ne produiraient que de bas niveau d'organisation. Mais occasionnellement, et de façon de plus en plus improbable en fonction de l'élévation du niveau d'organisation, des entités plus organisées pourraient apparaître. Pourquoi n'en observons-nous pas davantage ? Parce que vu les dimensions considérables de l'univers ces entités hautement organisées sont très rares à notre échelle d'espace-temps. De plus, par un effet de « sélection », nous ne voyons que le type d'univers hautement improbable qui nous a donné naissance, et non d'autres éventuellement différents. Il s'agit là de l'application avant la lettre, par Boltzmann, du principe anthropique faible.

Ceci conduit au concept de cerveau de Boltzmann. Si le niveau d'organisation de notre univers, comportant de nombreuses entités conscientes, est le résultat d'une fluctuation au hasard, son émergence est bien moins probable que celle de niveaux d'organisation moins élevés, seulement capables de générer une seule entité consciente, elle-même plutôt rustique. Ces entités devraient donc être d'autant plus nombreuses que serait élevée la probabilité de leur apparition. Ainsi devraient exister des millions de cerveaux de Boltzmann isolés flottant dans des univers faiblement

organisés. Il ne s'agirait pas, comme nous l'avons rappelé plus haut, de cerveaux biologiques tels que nous les connaissons, mais seulement de structures algorithmiques suffisamment organisées capables de jouer le rôle d'observateurs tels que le sont les humains quand ils observent leur univers. Un cerveau ne pouvant par ailleurs fonctionner sans un corps qui lui fournit l'information sensorielle dont il a besoin pour conceptualiser, il vaudrait mieux parler de robots de Boltzmann (voir notre chapitre Les robots)

C'est ici que l'on rejoint la science moderne, notamment la cosmologie. Celle-ci postule que ce que nous observons, donnant naissance aux lois de la physique, s'applique à l'univers tout entier. Dans la physique « réaliste », l'univers « en soi », existant indépendamment des observateurs, est donc conforme à ce que nous observons. Pour notre part, dans le présent article, afin prendre en compte la relation entre l'observateur et l'observé introduite par la physique quantique, nous dirions que ce que nous observons décrit un certain type de relations entre l'observateur et l'observé, typique de l'univers tel qu'il nous apparaît. Si nous retenons l'hypothèse constructiviste développée par certains physiciens quantiques, nous irons plus loin. Nous supposons que ce que nous observons décrit un univers créé par la relation entre l'observateur que nous sommes et l'observé que nos instruments nous permettent de caractériser. Mais dans tous les cas, la position unique d'observateur qui est la nôtre devrait nous permettre d'affirmer que l'univers tel que nous l'observons (ou le construisons) est lui-même unique.

Ce ne serait plus le cas si, conformément à l'hypothèse des cerveaux de Boltzmann, il existait des myriades d'observateurs observant un univers plus global que celui que nous observons. Ceux-ci pourraient être si nombreux, dans un futur de plusieurs milliards d'années, qu'ils nous remplaceraient en tant qu'observateurs. De ce fait, l'univers que nous avons cru pouvoir décrire perdrait toute pertinence. Des visions du cosmos profondément différentes de celles que nous en avons pourraient remplacer la nôtre. Il ne s'agirait d'ailleurs pas de simples visions virtuelles mais en fait d'univers différents qui se substitueraient au nôtre, si l'on retient l'hypothèse que les univers naissent de l'interaction entre observé et observateur.

Des fluctuations dans l'énergie du vide

Selon Andréi Linde, ce ne seraient plus des fluctuations dans le niveau d'entropie qui généreraient des cerveaux de Boltzmann, mais des fluctuations dans la force répulsive, qualifiée d'énergie noire, constante cosmologique ou énergie du vide. On retrouve là les hypothèses déjà familières relatives à l'énergie du vide. Il est à peu près admis que le vide quantique fluctue puisque par définition, les « particules » qui le peuplent ne peuvent être au repos. Il peut en émerger de façon aléatoire des couples de particules-antiparticules qui s'annihilent, mais aussi des photons voire des atomes qui interagissent avec la matière ordinaire. La cosmologie quantique considère que c'est ainsi que notre univers est apparu. Nous avons vu que l'hypothèse est également retenu pour justifier la théorie des multivers. Rien n'interdit de penser que sur une durée de temps suffisante, puisse se produire une émergence moins complexes ou

plus complexes, selon le point de vue retenu. Il s'agirait des cerveaux de Boltzmann, phénomènes très improbables mais non entièrement impossibles.

La probabilité d'apparition d'une entité consciente répondant aux caractéristiques du cerveau de Boltzmann serait si faible qu'aucune d'entre elles, dit-on, n'aurait eu la chance de se matérialiser pendant les 13,7 milliards d'années correspondant à l'histoire de notre univers. Mais si celui-ci s'étend indéfiniment sous la pression de l'énergie noire, sa durée de vie s'étend elle-même sans limites et les chances de voir apparaître des cerveaux de Boltzmann augmentent considérablement. Ces cerveaux, il est vrai, n'observeraient plus un univers tel que nous connaissons, mais des espaces uniformes, froids et noirs, inhospitaliers pour nos formes de vie. Alors nos propres intelligences auraient depuis longtemps disparu et la forme d'intelligence incarnée par ces cerveaux dominerait le cosmos entier.

Il nous semble que, plus immédiatement, des hypothèses exploitant le concept des cerveaux de Boltzmann mériteraient d'être formulées. Peut-être même pourrait on essayer de les vérifier. La possibilité de voir émerger, dans notre monde matériel, à partir de l'énergie du vide, des objets complexes pouvant éventuellement prendre la forme d'entités intelligentes ne serait pas à exclure. Le fait que cette émergence soit hautement improbable, sur la trop courte période de 14 milliards d'années, n'interdit pas en effet qu'elle ait pu se produire, au moins une fois. Point n'aurait été pour cela besoin d'attendre des trillions d'années. Ainsi, si mes chances de gagner à la loterie sont infimes, rien ne m'interdit en termes de probabilités de gagner dès le premier coup, quitte à ce que cette éventualité ne se reproduise plus avant un très long temps

Autrement dit, un ou plusieurs cerveaux de Boltzmann, incorporés à des ensembles d'atomes plus ou moins organisés, auraient déjà pu apparaître dans notre monde à partir de l'énergie du vide. Certains d'entre eux se sont peut-être développés dans des parties de l'univers que nous ne connaissons pas ou que nous ne connaissons jamais, compte tenu de l'expansion. Pourquoi, de la même façon, ne pas faire l'hypothèse que l'intelligence des systèmes biologiques dont nous sommes des composants puisse être née d'une émergence de cette nature. Dans cette même ligne de conjectures, nous ne pouvons pas exclure la possibilité de voir un cerveau de Boltzmann se matérialiser dans notre monde sous une forme et dans des circonstances que nous n'aurions évidemment pas pu prévoir. Il serait paradoxal que si ce phénomène pour le moins surprenant se produisait sous nos yeux, nous l'attribuions à la manifestation d'un extra-terrestre – voire pour les esprits religieux à un miracle – alors qu'il ne s'agirait que d'une manifestation banale du monde quantique sous-jacent, monde dont nous ne connaissons encore pratiquement rien.

Un cerveau téléchargé

Il n'est même pas nécessaire d'aller si loin pour tenter de justifier l'existence possible des cerveaux de Boltzmann. On lit, dans le dernier livre du cosmologiste et futurologue Michio Kaku, que nous pourrions en créer nous-mêmes dans les prochaines décennies. Si comme il apparaît réaliste de penser que l'on pourra

prochainement télécharger le contenu d'un cerveau sur un support informatique, c'est-à-dire les principaux algorithmes servant à cet organe à se représenter lui-même et calculer, mis en évidence par les observations du cerveau actuellement en cours (Voir le Chapitre Le cerveau), ce sera facile d'envoyer ce jeu d'algorithmes vers d'autres planètes, voire des galaxies, en utilisant des émissions électromagnétiques. Dans le cas de la galaxie d'Andromède, proche de la Voie Lactée, le voyage, à la vitesse de la lumière, ne prendrait que quelques années. Pourquoi alors ces cerveaux dont la Terre ne peut pas prétendre avoir le monopole, n'entreraient-ils pas en résonance avec des cerveaux locaux. Et pourquoi ces cerveaux ne nous répondraient-ils pas ?

Chapitre 5. Les sciences du vivant. Biologie artificielle, biologie synthétique.

Le domaine des sciences du vivant est, comme tous ceux abordés ici, très étendu. Dans l'ensemble les sciences du 21^e siècle s'intéresseront à tous leurs aspects. Le vivant et sa survie font en effet partie des priorités de l'homme, puisque celui-ci en est une partie inséparable. Nous nous limiterons ici aux recherches dont les résultats seront les plus impressionnants et aussi les plus controversées: celles où le vivant côtoie l'artificiel. L'artificiel, auquel nous consacrerons le chapitre 5 suivant, se développe en effet si vite et d'une façon si entremêlée avec l'évolution de la société, qu'il a commencé à impacter le vivant.

5.1. Généralités

Ceci ne veut pas dire que le vivant devient artificiel, mais qu'apparaissent de nouvelles entités où le biologique proprement dit et l'artificiel entretiennent des relations symbiotiques. Il faudra continuer cependant à considérer ces entités comme vivantes, puisque dans l'ensemble elles continueront à manifester les caractères par lesquels on distingue la matière vivante de la matière inanimée: capacité à s'opposer au 2^e principe de la thermodynamique qui établit l'irréversibilité des phénomènes physiques, aptitude à se reproduire, aptitude à muter et se diversifier, notamment.

Nous continuerons donc ici à employer le terme de biologie, pour distinguer les forces qui s'y exercent de celles touchant le monde matériel, sur Terre et surtout dans le cosmos. Rappelons à cet égard que malgré des recherches de plus en plus précises, aucune forme de biologie n'a encore été identifiée dans celui-ci, y compris au sein des planètes proches.

Les développements futurs de la biologie découleront pour l'essentiel de la généralisation des applications de la génétique, ou plus exactement de la génomique (connaissance et modifications du génome, non reproductif ou reproductif). Celles-ci, loin d'être ostracisées, se répandront, compte-tenu des bénéfices attendus. On peut

penser que, sauf accident toujours possible, les dangers de ces pratiques seront bien contrôlés. Ce qui est actuellement à juste titre combattu dans certains pays est l'appropriation des recherches sur les génomes et leurs modification par des firmes géantes qui conduisent ces recherches dans les seules directions capables de leur apporter des profits immédiats, et qui de plus brevètent les résultats obtenus afin d'en priver le reste de la société. Monsanto est souvent pris en exemple, mais il en existe bien d'autres.

Il s'agit de comportements à l'opposée de la déontologie de la recherche scientifique universitaire, qui publie ses résultats et ne cherche pas à limiter leurs applications. Cette déontologie est d'autant plus nécessaire que la génomique touche le vivant, patrimoine de tous. A l'inverse, en génomique comme plus généralement en médecine et pharmacie, les firmes qui, en vue de faire des bénéfices, consentent des investissements plus ou moins lourds, veulent se réserver le monopole de leur exploitation. Ajoutons que le vivant fait aussi l'objet d'importantes recherches couvertes par le confidentiel-défense, comme par exemple l'étude des effets de certaines substances sur l'organisme du soldat. La tendance au secret et à l'appropriation ne fera donc que s'étendre à l'avenir.

La combattre nécessiterait de forts mouvements d'opinions, soutenues par les scientifiques. On peut citer, plutôt que la lutte contre les OGM, souvent trop réductrice (répétons-le, ce ne sont pas les OGM en général qu'ils faut combattre, mais les OGM Monsanto), ce qui s'est passé à propos des recherches visant au décryptage du génome humain. Ce sont d'abord des sociétés privées qui les avaient entreprises à grande échelle, notamment celles créées par le généticien et homme d'affaires américain Craig Venter. Mais sous la pression des scientifiques et de l'opinion, les pouvoirs publics ont imposé, y compris en Amérique, patrie du libéralisme, compte tenu de l'importance de ces recherches pour l'ensemble de l'humanité, qu'elles soient conduites dans le cadre public, et que leurs résultats mis à la disposition de tous.

Les mêmes enjeux seront évoqués à propos de toutes les sciences et technologies. Les citoyens, les scientifiques et, en ce qui nous concerne, les matérialistes, devront en permanence faire valoir ce qui compte tenu de leurs valeurs devrait relever de l'intérêt général et appartenir, pour reprendre cette expression, au patrimoine de l'humanité, au regard de toutes les recherches possibles. Les choix ne seront jamais faciles, comme l'a montré la question de l'utilisation des cellules souches humaines embryonnaires en médecine. Constamment, de nouveaux chercheurs (on parlait jadis d'inventeurs) proposeront d'exploiter les résultats de leurs découvertes. La puissance publique devra disposer, non seulement de l'autorité nécessaire mais des crédits pour que ces recherches soient conduites en dehors des contraintes du marché. Ce sera de moins en moins le cas malheureusement, vu les restrictions croissantes mentionnées plus haut pesant sur la recherche fondamentale désintéressée.

En ce qui concerne la biologie génétique, l'on distingue dorénavant les espèces dotées de génomes dont un certain nombre de groupes de gènes ont été artificiellement modifiés ou interchangés à partir de souches naturelles, et celles dont les génomes sont totalement contruits à partir d'éléments biochimiques de synthèse.

Dans le premier cas, on pourra parler de génomes artificiels (pour génomes artificiellement modifiés) et dans le second cas de génomes synthétiques. D'où les termes plus généraux de biologie artificielle et de biologie synthétique. La seconde est encore exceptionnelle, mais se généralisera, conjointement avec la première.

Il faut bien voir que, pour de multiples raisons dont certaines apparaîtront justifiées, une grande partie des espèces vivantes en contact avec l'homme seront partiellement ou totalement modifiées dans le demi-siècle. Ceci s'ajoutera à la grande extinction actuellement envisagée par les environmentalistes, résultant de l'action destructrice de l'homme dans les écosystèmes. A ce titre le terme d'anthropocène a été forgé pour désigner la nouvelle ère bio-géologique qui s'est ouverte il y a un siècle environ avec l'explosion de la société industrielle et de la démographie humaine.

Il ne faut pas se résigner à la disparition des espèces naturelles qui marque l'anthropocène. Mais il faut bien voir qu'il s'agit, sauf à supprimer l'humanité, de processus incontrôlables un peu semblables aux processus géologiques. Pour une espèce à grand peine protégée, des dizaines de milliers disparaissent chaque année

Ceci expliquera la quasi nécessité de la biologie artificielle. Pour l'anecdote, on évoquera les efforts faits actuellement pour rescussiter des espèces disparues, tel le mammoth laineux ou plus modestement, le pigeon voyageur nord-américain (passenger pigeon), totalement éteint aujourd'hui du fait de la chasse alors qu'il peuplait le continent par dizaines de millions au début du 20 siècle. L'essentiel des investissements de la biologie artificielle portera sur des espèces susceptibles d'une exploitation industrielle à grande échelle. D'ores et déjà existent de nombreuses études envisageant les besoins à satisfaire et les solutions rendues possibles par des techniques appropriées:

- * virus, bactéries et micro-organismes. L'objectif sera d'obtenir, à partir de ressources largement disponibles (par exemple déchets transformés grâce à des bactéries photosynthétiques) des produits ou de l'énergie actuellement rares.

- * végétaux. Seront développés des végétaux terrestres ou océaniques encore inconnus aujourd'hui capables de s'adapter aux régions rendues infertiles par les transformations en cours des milieux naturels.

- * animaux supérieurs. Le même objectif conduira à obtenir des animaux de consommation courante plus économes ou plus efficaces en terme de production de ressources d'origine agricole. De nouvelles variétés ou espèces se multiplieront. Les hybridations d'espèces elles-mêmes génétiquement modifiées se multiplieront, faisant disparaître des classifications traditionnelles depuis Cuvier et autres naturalistes. De plus en plus, par ailleurs, les cellules extraites de tissus présentant un intérêt économiques seront cultivées in vitro, à large échelle. D'ores et déjà une viande de synthèse a été proposée expérimentalement à la consommation. Les espèces « historiques » ne seront conservées qu'à titre documentaire.

- * espèce homo sapiens. Très vite enfin, pour des raisons thérapeutiques ou afin

d'améliorer les descendance, le génome humain sera marginalement puis, plus systématiquement, modifié. Les avantages, en terme de lutte contre les maladies, d'amélioration des performances physiques et mentales, de longévité, seront telles que ces modifications seront très globalement acceptées, sinon recherchées. On notera cependant que leur coût sera tel, au début, que ces modifications ne seront accessibles qu'à quelques favorisés. De plus leur généralisation sera lente, compte tenu de la longueur du cycle reproductif humain. La voie à des recherches conduisant à l'apparition de post-humains sera cependant ainsi ouverte. Mais, pour des raisons dites éthiques, elle sera, au moins initialement, explorée avec précautions.

Nous réserverons au chapitre 5 suivant la présentation des sciences et technologies de l'artificiel proprement dites, y compris en ce qui concerne leur impact sur l'homme et la société. Rappelons seulement à ce stade que le domaine de l'artificiel a très largement envahi et transformé, non seulement les milieux naturels, mais les sociétés humaines. Contrairement aux techniques de la génomique, celles de l'artificiel « pur » ont une capacité de prolifération, d'accélération qualitative et finalement de croissance exponentielle en face desquelles les valeurs de l'humanisme traditionnel ne pèsent guère. Elles se développeront initialement en parallèle, sinon en interaction, avec les modifications du vivant décrites dans le présent chapitre. Assez vite, elles s'autonomiseront, échappant éventuellement aux contrôles politiques classiques.

5.2. La biologie synthétique

Pour examiner les futurs développements de cette nouvelle forme de biologie, nous allons commenter ici un livre récent du biologiste Craig Venter, déjà cité plus haut. Il s'agit de *Life at the Speed of Light*, publié par Viking en 2013.

Présentation de Craig Venter

John Craig Venter (né le 14 octobre 1946, Salt Lake City) est un biologiste et homme d'affaires américain. Il s'est illustré dans la course au séquençage du génome humain grâce à une technique innovante. puis il rejoint les National Institutes of Health (NIH) en 1984.

Au sein des NIH, il travaille d'abord sur les récepteurs des neurotransmetteurs. Il cherche en particulier à isoler leurs gènes et les séquencer. Il devient ce faisant un des pionniers du séquençage automatisé.

Rappelons qu'en biochimie, le séquençage consiste à déterminer l'ordre linéaire des composants d'une macromolécule (les acides aminés d'une protéine, les nucléotides d'un acide nucléique comme l'ADN, les monosaccharides d'un polysaccharide, etc.).

En génétique, le séquençage concerne la détermination de la séquence des gènes voire des chromosomes, voire du génome complet, ce qui techniquement revient à effectuer le séquençage de l'ADN constituant ces gènes ou ces chromosomes.

À cette occasion de ses recherches au sein des NIH, il invente une approche systématique nouvelle, qu'il appelle les EST, *expressed sequence tags*, ou étiquettes de séquence exprimées. Il s'agit de fragments d'ADN complémentaires qu'il séquence de manière systématique, sans les caractériser au préalable. En 1991 et 1992, son équipe détermine la séquence de plus de 2500 EST associés à des gènes exprimés dans le cerveau humain, ce qui double d'un seul coup le nombre de gènes humains pour lesquels des données de séquence ADN sont disponibles.

Avec les NIH, son employeur, il dépose des brevets sur tous ces gènes, ce qui déclenche un tollé dans la communauté des biologistes. James Watson (prix Nobel, codécouvreur de la structure de l'ADN) sera parmi les plus farouches opposants à cette appropriation du vivant.

À la suite de la polémique, Venter quitte les NIH en 1992 pour monter une fondation privée appelée TIGR, *The Institute for Genome Research* et monte une plateforme de séquençage à grande échelle. Il recrute Hamilton Smith, prix Nobel de Médecine 1978 pour la découverte des enzymes de restriction. Avec lui, il va s'attaquer au premier séquençage complet du génome d'un organisme vivant, la bactérie *Haemophilus influenzae*, qui sera achevé en 1995. Après cet exploit, Venter et le TIGR s'engageront dans les séquençages de génomes de plusieurs organismes.

En 1998, Venter quitte le TIGR et fonde la Celera Genomics avec le soutien de la société Perkin-Elmer. Il devient le président et le directeur scientifique de cette nouvelle société dont l'objectif est de séquencer le génome humain, entrant ainsi en compétition avec le consortium public international. En 2000 Venter et Celera annoncent avoir fini de séquencer le génome, en même temps que le consortium international. On apprendra plus tard que le génome séquencé par Celera est celui de Craig Venter lui-même.

En 2002, Venter quitte Celera et monte le J. Craig Venter Institute. Ses nouveaux objectifs sont d'explorer la biodiversité génomique et de parvenir à recréer un organisme vivant synthétique en laboratoire. Venter est actuellement président du Center for the Advancement of Genomics.

Le livre

Life at the speed of light. From the double helix to the dawn of digital Life, de Craig Venter, fait partie du peu de livres conjuguant à la fois l'information scientifique et la prospective qui soient selon nous aussi importants aujourd'hui. Cet ouvrage reprend à la lumière de l'actualité, avec beaucoup de nouvelles données, les bases exposées par l'auteur dans son premier ouvrage « *A life decoded* ».

Craig Venter avait jusqu'ici dans certains milieux, notamment chez les biologistes, une réputation de business- man plutôt que de scientifique. Cela tenait au fait qu'il avait créé quelques entreprises ou fondations visant à recueillir des fonds pour ses recherches, y compris en brevetant quelques-uns des produits de celles-ci afin de s'en réserver l'exploitation commerciale. Mais la démarche était sans commune mesure avec celle adoptée depuis par les grandes multinationales de la génétique opérant dans le domaine agricole: monopoles sur les semences ou les produits collatéraux imposés aux cultivateurs traditionnels et légitimement combattus par les adversaires des OGM. Craig Venter n'a finalement rien fait de tel, alors que lui et ses équipes se sont donné les moyens théorique de bouleverser les sciences de la vie...et d'en faire payer le prix (en dehors d'un Prix Nobel qui serait parfaitement justifié, si ne s'y opposaient pas des lobbies religieux)

On lui a reproché également un égo surdimensionné. Mais qui peut prétendre se faire entendre dans le monde cruel des chers professeurs et des conflits d'intérêts incessants sans un minimum de personnalité. Le livre en tout cas ne donne pas d'arguments sérieux à cette critique. Une bonne moitié de l'ouvrage, sinon davantage (sans compter des dizaines de pages de références) est consacré à recenser les travaux antérieurs aux siens et ceux de ses équipes successives, comme les recherches menées par d'autres en parallèle.

Sur un plan géopolitique, on se convaincra par contre, en lisant le livre, que, dans le domaine de la génomique comme dans celui d'autres sciences émergentes, rien ne se serait produit d'important sans l'extraordinaire fertilité scientifique de la société américaine. Aujourd'hui, on reproche à celle-ci de privilégier les recherches militaires ou, dans un autre ordre d'idées, de céder aux oukases des créationnistes et autres intérêts religieux pour lesquels la vie ne saurait relever d'une approche scientifique. Mais il faut féliciter Craig Venter de ne pas avoir cédé aux pressions conservatrices, tant de la Darpa qui a financé certaines de ses recherches, que des nombreux représentants des mouvements chrétiens qui l'auraient bien réduit au silence s'il s'était laissé faire.

Quand on constate en Europe les campagnes incessantes que mènent des personnalités incapables de la moindre démarche créatrice, au nom d'un prétendu principe de précaution, pour neutraliser les laboratoires travaillant dans le domaine de la synthèse de la vie et plus généralement les biotechnologies, on se dit que les Européens, chefs d'Etat en tête, ont la société timorée qu'ils méritent, par leurs esprit étroitement bornés, sinon par leur simple ignorance. Reproche injuste, répondra-t-on. On trouve en Europe, par exemple, diverses Génopoles, dont celui d'Evry en France. Mais combien d'années leurs promoteurs ont-ils dû attendre avant d'être écoutés? Et pourquoi reçoivent-ils des financements aussi squelettiques?

Au demeurant d'ailleurs, Craig Venter ne peut se faire reprocher d'avoir sous-estimé les risques de dérive pouvant provenir des recherches en biologie génétique. Il a multiplié les mises en garde et contribué à la création de divers comités d'éthique dont les recommandations demeurent aujourd'hui d'actualité.

Thèmes du livre

Le livre comporte deux séries de chapitres. Les premiers sont consacrés aux efforts longs et difficiles ayant permis de mettre au point des méthodes rapides de déchiffrement des génomes (dont le génome humain) puis de créer des espèces originales authentiquement synthétiques. Pratiquement, les premières réalisations, comme l'indique l'article publié par l'équipe de Craig Venter dans la revue *Science* en 2010 (voir ci-dessous), ont consisté à implanter un génome aux séquences digitalisées et reconstruites à partir d'une synthèse des composants organiques de base dans le « corps » d'un microorganisme proche dépourvu de son propre génome.

L'exploit paraît simple, mais lorsque, comme l'explique Craig Venter, on prend conscience de l'énorme complexité des gènes et des protéines impliquées dans le fonctionnement d'une cellule à partir de son génome, on comprend la joie des équipes (et le champagne offert) quant celles-ci ont constaté que l'espèce (mycoïde) ainsi créée pouvait se reproduire et se battre pour la vie comme n'importe laquelle de ses homologues naturelles.

Un grand pas restait à franchir dans une authentique recréation de la vie à partir de ses composants, construire l'enveloppe ou cytoplasme d'une cellule entièrement artificielle, ainsi que les nombreux micro-organismes eux-mêmes artificiels inclus (chloroplastes, mitochondries), indispensables au fonctionnement autonome de la machine cellulaire. Ce travail est en cours dans le cadre de plusieurs projets intéressants des cellules isolées. Les chercheurs commencent par ailleurs à réfléchir à la façon dont certaines de ces cellules artificielles pourraient se combiner pour produire des organismes multicellulaires aux fonctions diversifiées.

La seconde série de chapitres composant le livre décrit les différentes perspectives de la vie synthétique ainsi ouvertes. Elles vont bien au-delà des simples modifications génétiques permettant à des êtres existants de s'adapter à des conditions de milieu nouvelles (chaleur, sécheresse, manque de nutriments). Il s'agira progressivement de construire des organismes originaux jugés utiles. Ce seront d'abord des virus, bactéries, phages, levures capables par exemple de produire de l'énergie à partir de déchets, ou de fournir des matières premières alimentaires ou non consommables par l'homme. Les phages devraient jouer un rôle important dans la lutte contre des bactéries devenues résistantes aux antibiotiques, lesquelles posent un défi majeur à l'humanité actuelle. Mais il s'agira aussi, progressivement, de synthétiser des formes végétales et animales complexes pouvant s'adapter à des environnements nouveaux et modes de vie inattendus.

Un point sur lequel insiste Craig Venter, peut-être avec un peu d'excès, concerne la possibilité, une fois numérisé un génome, de le transmettre à l'autre bout du monde, voire sur une autre planète, jusqu'à une machine dite *Digital Biological Converter* capable de reconstruire ledit génome à partir des composants disponibles dans le milieu récepteur. C'est ce qu'il nomme la téléportation de la vie, ou « la vie à la vitesse de la lumière ». Les besoins paraissent limités, à première vue. Mais, en

dehors de l'exploration planétaire, de tels dispositifs trouveront de nombreuses applications en médecine, notamment au profit des pays pauvres.

Un certain nombre d'ouvrages décrivent dorénavant les perspectives utiles ou dangereuses découlant des avancées rapides en biologie synthétique dont Craig Venter a été le pionnier. Tout travail sérieux en prospective doit les connaître (voir par exemple ci-dessous). Pour notre part, nous ne pouvons que souhaiter au livre de Craig Venter, très facile à comprendre, une large diffusion. Peut-être ce travail donnera-t-il des idées à des responsables économiques et politiques à la recherche de nouvelles perspectives de croissances.

5.3. La manipulation des organismes vivants

Comme dans la section précédente, nous allons sur ce thème commenter l'ouvrage d'une journaliste scientifique renommée, Emily Anthes. Il s'agit de:

Frankenstein's Cat. Cuddling up to Biotech's Brave New Beasts 2013 par Farrar Strauss and Giroux aux USA, Oneworld Publications en Grande Bretagne.

Présentation d'Emily Anthes

Emily Anthes est britannique. Elle vit à New York Elle a publié de nombreux articles dans diverses revues The New York Times, Wired, Scientific American, Psychology Today, BBC Future, SEED, Discover, Popular Science, Slate, The Boston Globe Elle est aussi l'auteur d'un premier livre Instant Egghead Guide: The Mind (St. Martin's Press, 2009). Elle anime plusieurs blogs principalement dédiés à discuter l'évolution de la science d'un point de vue sociétal. Elle est diplômée du MIT et de Yale.

Le livre

Son nouveau livre, commenté ici, porte principalement sur les formes et les conséquences du bioengineering, autrement dit des différentes formes de manipulation des organismes vivants, appliquées principalement à l'animal. Ce faisant, elle n'hésite pas à transposer à la biologie humaine, actuelle ou future, les conséquences de ces travaux sur l'animal.

Nous venons d'examiner le dernier livre du généticien et homme d'affaires Craig Venter, Life at the speed of Life. Celui-ci aborde indirectement les mêmes questions, mais il insiste sur son propre travail et ses conséquences. Il s'est illustré en effet dans le séquençage du génome humain, puis dans celui de nombreux organismes, avant de réussir le défi jugée jusqu'alors par beaucoup impossible, consistant à créer à partir de composants de la biochimie un organisme entièrement artificiel, le mycoplasme *Mycoplasma mycoides JCVI-syn1.0*. Depuis, il réfléchit aux différentes conséquences possibles de cet exploit, dont l'une, donnant le titre de son livre,

consisterait à créer de nouvelles formes de vie sur d'autres planètes.

Emily Anthes n'a pas derrière elle la grande culture scientifique de Craig Venter. Elle se borne à se comporter en excellente journaliste scientifique, relatant un grand nombre d'expérimentations en biologie et biologie génétique, interrogeant quand elle le peut leurs responsables, et réfléchissant aux conséquences scientifiques, économiques et morales de ces expériences. Il faut noter sur ce plan que la bibliographie de son livre fournit les références, non seulement d'articles déjà publiés par les auteurs de ces expériences, mais souvent la possibilité de les joindre par Internet afin de se tenir au courant de l'évolution de leurs recherches. Le livre constitue de ce fait un véritable atlas de ce qu'il faut bien appeler l'animal modifié, voire l'animal augmenté.

Les organismes génétiquement modifiés

Le lecteur jusque là mal informé apprend ainsi en la lisant de nombreux faits demeurés ignorés du grand public, bien que leurs conséquences le toucheront nécessairement, un jour ou l'autre. C'est ainsi que le livre commence en relatant les opérations d'un laboratoire chinois, dirigé par un chercheur nommé Tian Xu aux universités de Fudan et de Yale (voir <http://medicine.yale.edu/lab/xu/index.aspx>). L'objet en est de modifier les gènes de ces souris afin d'étudier leur rôle et les conséquences de ces modifications. Ce laboratoire ne travaille pas dans le secret, au contraire. Il a procédé à un nombre impressionnant de publications disponibles sur différents sites, notamment celui de PLoS Genetics. Chacun peut s'en inspirer pour expérimenter à son tour.

Ces travaux sur les souris donnent à Emily Anthes l'occasion de poser différentes questions, soit pratiques, soit véritablement philosophiques, qui se retrouveront tout au long du livre. Le Pr Tian Xu fait incontestablement progresser la génétique, y compris selon lui les recherches sur les cellules cancéreuses humaines. Mais il crée ce faisant des générations de véritables monstres, des dizaines de milliers d'animaux mutants qui mènent inévitablement des vies malheureuses.

Faut-il s'apitoyer sur le sort des souris et rats de laboratoire, déjà depuis longtemps soumis à des manipulations traumatisantes ? Si l'on admet ces manipulations sur les rongeurs, à quel moment s'arrêtera-t-on, en s'élevant dans l'échelle des espèces, y compris au niveau des porcs et primates proches de l'homme, objets eux aussi de nombreuses expériences de laboratoire ?

Et pourquoi ne pas commencer à aborder selon les mêmes procédures les manipulations chirurgicales ou génétiques sur l'homme ? C'est déjà le cas indirectement lorsque l'on greffe des tissus ou organes humains sur des animaux, ou réciproquement. A quel niveau décidera-t-on de s'arrêter, et faut-il même décider de s'arrêter ? Peut-on enfin prétendre « moraliser » les recherches sur l'animal, tout en acceptant les conditions souvent insupportables de l'élevage et de l'abattage des

animaux de boucherie.

Face à ces problématiques, le livre se ne livre pas aux considérations banales que l'on trouve déjà dans les médias, mais donne des exemples précis montrant l'actualité des questions scientifiques et déontologiques évoquées. Il s'agit de problèmes plus que sérieux, qui obligent à questionner autrement que d'une façon écologique naïve le rôle de l'espèce humaine dans la nature.

Pour Emily Anthes, les humains perdraient leur temps à discuter le plus ou moins grand impact de l'humanité sur la nature. Cet impact s'est fait sentir dès le paléolithique. Il ne cesse de s'étendre. La question n'est donc pas de savoir s'il faut ou non modifier les animaux et leurs modes de vie, mais comment le faire, avec quel outils, dans quelles circonstances et dans quel buts. Le danger, selon son expression, serait de jeter le bébé génétiquement modifié avec l'eau du bain. Les biotechnologies peuvent aussi servir à améliorer la santé et le sort des animaux – comme la santé et le sort des hommes.

Le clonage

Le livre ne se borne pas à examiner les questions posées par les manipulations génétiques. Il insiste aussi sur une question souvent évoquée depuis le clonage de la brebis Dolly: celle de l'intérêt de généraliser de tels clonages, notamment en ce qui concerne les animaux supérieurs. Le clonage, on le sait, est pratiqué, d'ailleurs à petite échelle, par les éleveurs du secteur agro-alimentaire. Il a succédé à des siècles de sélection visant à produire de nouvelles sortes d'animaux à usage économique ou pour l'agrément des propriétaires. Ces sélections ont produit souvent de véritables monstres, notamment chez les animaux destinés à la boucherie, dont la présence ne trouble personne

Mais il semble que le clonage artificiel devienne, dans les sociétés développées qui nourrissent un attachement souvent névrotique pour les animaux familiers (*pets* en anglais) une véritable maladie sociale. Les « propriétaires » d'animaux domestiques qui en ont les moyens consacrerait semble-t-il des sommes considérables pour faire revivre à travers le clonage les commensaux qui leur étaient chers. Emily Anthes en multiplie les exemples. Elle ne dénonce pas assez nettement, pensons nous, le caractère irresponsable de telles opérations.

D'une part, il s'agit d'illusions. Un animal cloné n'est jamais semblable, vu les différences dans l'expression des gènes, à celui qui lui servait de modèle. De plus, il comporte de nombreuses invalidités qui en font généralement un infirme, à bref ou à long terme. Enfin les sommes ainsi dépensées sont prélevées sur le produit national global sans aucun résultat positif. Ces arguments s'appliquent à plus grande échelle en ce qui concerne le clonage humain, qui est aujourd'hui encore à juste titre légalement

interdit.

Les greffes et augmentations artificielles d'organes

Beaucoup plus intéressantes sont les greffes d'organes ou la réalisations de prothèses, pouvant, chez l'animal comme chez l'homme, pallier les conséquences de certaines maladies ou accidents, voire réaliser de véritables « augmentations », tant au niveau des organes moteurs que, dans certains cas, du cerveau. Le sujet est connu et discuté. N'y revenons pas ici. Nous verrons que le thème sera de plus en plus d'actualité, avec la réalisation de robots anthropomorphes, pouvant être associés avec des humains d'une façon plus ou moins étroite. Si l'humanité peut un jour espérer peupler d'autres planètes, par l'intermédiaire d'animaux ou d'humains modifiés, ce sera inévitablement sous cette forme.

Faut-il le craindre? La première de couverture du livre le donne à penser, en présentant un chat robotisé qualifié de créature de Frankenstein. Or condamner les travaux visant à réaliser de tels chats, dès lors qu'ils ne se feraient pas au détriment direct de sujets biologiques, serait condamner le développement de la robotique anthropomorphe. Nul ne devrait en prendre la responsabilité. Nous verrons par contre, à l'occasion ci-dessous de la présentation d'un ouvrage sur ce thème (*Pardon the Disruption. The Future you never saw coming*), que des adaptations sociologiques et juridiques seraient nécessaire, pour éviter les conflits entre valeurs pouvant en résulter.

Emily Anthes n'entre pas dans ces considérations juridiques. Elle se borne à évoquer – trop rapidement pensons nous - deux sujets politiquement sensibles. Le premier concerne le coût de toutes les manipulations qu'elle a énumérées. Quelles sociétés ou plus exactement quels privilégiés au sein de ces sociétés peuvent-ils se les permettre. Au détriments de quels autres investissements? Le second sujet concerne, comme en ce qui concerne les autres technologies évoquées ici, le rôle des armées dans la définition et l'affectation des nouveaux organismes ainsi mis au point. On peut craindre qu'elles ne les utilisent dans des guerres de nouvelles générations. Mais on fera remarquer que, sans la motivation militaire, personne ne se donnerait le mal de financer les recherches correspondantes.

5.4. Sciences du vivant et évolution du droit

Sur tous les thèmes examinés dans cet essai, la question de l'évolution du droit se pose au même titre que celle de l'évolution des consciences morales. Nous en traiterons ici, dans ce chapitre consacré aux sciences du vivant, compte tenu de leur caractère particulièrement sensible. Mais le lecteur pourra transposer ces considérations à d'autres sujet, notamment à la robotique et à la conscience

artificielle.

Généralités

Appelons Droit, d'une façon résumée, les règles qui déterminent les comportements des sociétés et des personnes au regard de valeurs considérées comme communes par ces dernières. Dans les anciennes civilisations, ces règles étaient souvent l'objet de coutumes non écrites, mais néanmoins impératives. On parlait de droit coutumier. Dans les sociétés encore dominées par les religions, ce sont des textes dits sacrés, censées avoir été inspirées par la Divinité, qui jouent de rôle. Mais en fait dans ce cas, ce sont des prescriptions créées par des prêtres, au mieux des intérêts des religions et des Eglises, qui déterminent les obligations s'imposant à chacun. Ceci rend ces règles, telles celles de la charia musulmane, totalement inacceptables dans les sociétés laïques telles que les nôtres. Depuis ce que l'on a nommé le siècle des Lumières, en Europe puis plus généralement dans les pays dits occidentaux, les règles de droit ont été définies sur le mode démocratique, c'est-à-dire permettant au mieux l'élaboration d'une volonté générale bénéficiant d'un commun accord. Ce sont les institutions représentatives, librement élues, qui sont chargées de cette difficile mission. En simplifiant, nous dirons que les Assemblées constitutionnelles nationales définissent l'organisation globale du pouvoir politique et juridictionnel. Au niveau inférieur, les structures représentatives élues dans ce cadre national déterminent le droit applicable en détail, c'est-à-dire les lois et règlements, tant dans le domaine pénal que dans le domaine civil, ainsi que les sanctions découlant de leur inobservance. Il s'agit de ce que l'on nomme globalement le pouvoir législatif.

Les conditions de détail d'application des lois et les sanctions y afférentes sont dans l'ensemble, définies par un deuxième pouvoir, le pouvoir exécutif, exercé concrètement par les gouvernements et les administrations sous leurs ordres. Enfin les juges, représentants du troisième pouvoir, le pouvoir judiciaire, sont chargés de sanctionner la non-application des lois, que celle-ci provienne des individus ou des organisations. Dans certains pays, les juges sont nommés par l'exécutif. Dans d'autres ils sont élus par les citoyens. Les deux systèmes présentent des avantages et des inconvénients spécifiques, au regard de l'indépendance du pouvoir judiciaire

Au plan international, la souveraineté des Etats demeure la règle. Cependant, la multiplication des problèmes communs posés aux Etats, comme le développement des relations internationales entre personnes et entreprises, a imposé un Droit international, pénal ou civil, de plus en plus étendu, tant dans sa portée pratique que dans ses ambitions.

Une bonne démocratie, comme ce fut affirmé dès la Rome antique, repose sur la séparation et l'indépendance des trois pouvoirs, législatif (y compris dans le domaine constitutionnel), exécutif et judiciaire. Elle suppose aussi la mise en place par consensus interindividuel, d'un nombre grandissant de règles communes. Il est évident que ces règles communes sont définies sur la base de pratiques comportementales et de convictions morales déjà existantes. Ni les gouvernements ni le droit ne peuvent inventer les mœurs. Mais ces pratiques et ces convictions elles-

mêmes évoluent nécessairement, en fonction de nombreux facteurs. Les uns tiennent aux échanges internationaux, belliqueux ou pacifiques, qui entraînent des mutualisations. Les autres, les plus nombreuses, découlent de l'évolution des structures économiques et des technologies. Beaucoup d'observateurs considèrent que cette évolution échappe en grande partie aux décisions volontaires. Mais cela n'empêche pas que le droit doive en tenir compte, pour réguler au mieux leur exercice, compte tenu des principes généraux du droit.

Au plan supra-étatique, autrement dit international, il faut distinguer deux niveaux de compétences. Dans les deux cas doit s'y exercer la séparation des pouvoirs. Les unes sont dites régionales, si elles ne concernent que de grandes régions du monde ayant formé des alliances politiques, comme au sein de l'Union européenne. Les autres peuvent être universelles, autrement dit mondiales. Dans les deux cas, l'établissement des règles de droit, et dans beaucoup de cas les sanctions découlant de leur non-respect, sont de la compétence d'institutions dites internationales, dont l'autorité a été reconnue par les Etats dans le cadre de Traités. Les plus connues de ces institutions sont, dans un cadre régional intéressant l'Europe, celles relevant de l'Union européenne. Au plan mondial, ce sont les nombreuses « organisations internationales » couronnées par l'ONU, qui jouent ce rôle. Leurs domaines ne cessent de s'étendre, avec le développement de ce que l'on nomme mondialisation ou globalisation.

Il y a toujours un retard entre l'évolution des mœurs et des comportements et celle des règles de droit en découlant. Ceci tient au fait qu'en pratique, même dans le cas de systèmes politiques autoritaires ou interventionnistes, ceux-ci sont dans l'ensemble impuissants à diriger de façon volontariste, et plus encore arbitraire, la vie concrète des sociétés, non plus que les imaginaires traduisant la façon dont ces sociétés se représentent leur avenir. Mais ce retard peut être plus ou moins grand, selon l'ampleur du fossé existant entre les éléments les plus moteurs du corps social et les institutions juridiques chargées de définir des règles d'ensemble. Dans certains cas, ce retard peut prendre la forme d'un véritable déphasage entre les comportements innovateurs et les règles institutionnelles, pouvant générer des conflits éventuellement insolubles dans le cadre des institutions. Certains citoyens pourront revendiquer la possibilité de se placer en dehors du Système juridico-organisationnel dominant. Ils pourront même envisager de conduire de véritables révolutions.

Les esprits les plus conservateurs considéreront ces révolutions comme porteuses d'effets destructeurs, et donc devant être combattues, notamment par l'application la plus restrictive des règles de droit et des valeurs les sous-tendant. Les esprits plus ouverts s'efforceront au contraire de repenser le droit et les valeurs afin de leur permettre d'intégrer des innovations généralement conçues non seulement comme inévitables voire éminemment souhaitables. Mais, ainsi que nous l'avons rappelé plus haut, il ne leur sera pas possible de créer un droit véritablement nouveau, si les conditions sociologiques, économiques et technologiques favorables ne sont pas déjà en place dans la société considérée, ne fut-ce que sous une forme peu explicite voire quasiment cryptée, indéchiffrable par le plus grand nombre.

Pour provoquer l'évolution nécessaire des esprits, précédant celle des moeurs et du droit, les scientifiques impliqués dans de nouvelles recherches et découvertes, ainsi que les rares esprits ouverts et informés qui étudient leurs travaux sur un plan quasi philosophique, ont un rôle essentiel à jouer. Ils doivent communiquer de façon accessible à l'attention du plus grand nombre, ceux qu'en démocratie l'on nomme les citoyens. Ce sera la conviction de ceux-ci qui sera la plus à même de faire évoluer le droit. Les Etats-Unis, malgré tous leurs défauts, sont aujourd'hui moteurs dans cette direction. Il s'agit certes d'une des sociétés les plus imprégnées de préjugés religieux et politiques pouvant favoriser un conservatisme étroit. Mais c'est aussi une société où les chercheurs disposent de plus de ressources pour faire émerger un monde en devenir. Certes ces ressources proviennent pour l'essentiel des institutions militaires et de grandes corporations dont les ambitions démocratiques sont plus que limitées. Mais comme le milieu scientifique et intellectuel reste encore très indépendant, certains diraient « libertariens », des réflexions iconoclastes, en regard des religions, des moeurs et du droit, peuvent y naître et y circuler.

Pour concrétiser le débat, nous procéderons comme précédemment, en examinant le livre de trois juristes américains, très informés des grands enjeux scientifiques du futur, et souhaitant provoquer une évolution du droit américain, aussi réticent que le droit européen à en tenir compte. Le droit américain n'est pas exactement comparable au droit français, notamment en matière pénale. Mais ces différences sont trop mineures pour retirer de l'intérêt à leurs réflexions. Celles-ci sont centrées sur l'inadaptation risquant de devenir dramatique des institutions juridiques et judiciaires, américaines mais aussi internationales, au développement, entre autres, des prothèses ayant pour objet l'augmentation de l'homme, de la robotique intelligente, de la conscience artificielle et, dans un autre domaine, de la colonisation de l'Espace.

La France est malheureusement très en retard sur ces divers plans. D'une part les recherches scientifiques y restent sous-financées et donc peu ambitieuses. D'autre part, la notion de philosophie critique y demeure très marginale et décalée au regard des réalités, Socrate et Platon étant semble-t-il encore les seuls maîtres à penser – comme le confirment les émissions de France Culture consacrées à la philosophie. C'est pourquoi nous pensons intéressant de présenter ici ces travaux qui devraient servir de matière première à toutes les réflexions visant à mieux connaître l'évolution des sciences et des pratiques sociales en découlant, afin d'en tirer des conclusions relatives à une souhaitable évolution du droit.

Le livre

Pardon the Disruption. The Future you never saw coming par Clayton R. Rawlings,
James Randall Smith, Rob Bencini
Wasteland Press, novembre 2013

Les auteurs

Clayton R. Rawlings, de Houston, est un ancien District Attorney pour le comté de Harris, Texas. Il a exercé 5 ans, comme avocat en matière pénale et 20 ans comme expert en litige à Houston.

James Randall Smith, de Houston, est lui-aussi un ancien District Attorney pour le comté de Harris, Il est aujourd'hui avocat au pénal et juge municipal à Houston

Rob Bencini, de Greensboro, fait fonction de conseil en développement et en prévision économique (Certified Economic Developer).

Questions abordées

Le livre étudie l'influence des diverses évolutions technologiques sur la vie sociale et notamment sur le droit qui est censé la réguler. En France, le sujet est souvent évoqué par les journalistes, mais il n'est pas encore abordé à fond par les législateurs, ni par les instances juridictionnelles supérieures, que ce soit la Cour de Cassation concernant le droit civil et criminel, ou le Conseil d'Etat pour le droit administratif. Il ne l'est pratiquement pas non plus par les instances syndicales et professionnelles représentant les magistrats et les barreaux. Juges, avocats et légistes en général en sont donc réduits à régler sous leur responsabilité et sans grand espoir de faire jurisprudence les cas délicats de plus en plus nombreux qui se présentent.

Citons par exemple le droit à faire mention en justice pénale d'éventuels fMRI (exploration du cerveau par résonance magnétique fonctionnelle) pouvant éclairer la responsabilité d'un accusé. Les experts devant les tribunaux s'en tiennent aux diagnostics classiques. Ce n'est que très récemment que les empreintes génétiques ont été utilisées systématiquement, au même titre que les empreintes digitales.

Concernant le droit européen, découlant notamment de décisions du Parlement européen et de la jurisprudence de la Cour européenne de justice ou d'autres instances européennes, la situation n'est guère meilleure. Les compétences technologiques des citoyens et des institutions évoluent rapidement à travers les Etats-membres, tous plus ou moins touchés par le progrès technique. Mais il n'en est pas encore résulté d'efforts pour harmoniser l'ensemble. Le fonctionnement des entreprises et la vie quotidienne des citoyens s'en ressentent, comme l'efficacité des administrations à compétence communautaire. Il est évident que cette situation ne pourra pas durer longtemps. La France est moins pénétrée que les Etats-Unis par les technologies de pointe, l'intelligence artificielle, la robotisation, mais elle le devient de plus en plus. Il en est de même des autres Etats.

Qu'en est-il du droit aux Etats-Unis? *Pardon the Disruption* surprendra beaucoup de lecteurs mal informés sur l'état de ce pays. Selon les auteurs, bons praticiens du Droit, américain, mais aussi bien informés des évolutions rapides de la science, le droit applicable aux Etats-Unis, qu'il résulte de textes constitutionnels et législatifs, des décisions des tribunaux soumis au contrôle d'ensemble de la Cour Suprême fédérale

ou de pratiques légales et coutumières locales, très différentes selon les Etats fédérés, devrait être repensé en profondeur pour tenir compte, selon le terme utilisé par le livre, d'un futur que personne n'a encore vu venir. Aux Etats-Unis comme ailleurs, plaident les auteurs, les technologies se développent sur le mode exponentiel, alors que le droit reste dans l'ensemble figé.

Le diagnostic n'est pas faux. Ceux qui connaissent un peu les Etats-Unis constatent régulièrement le profond traditionalisme des cours et des juristes. Le droit y est souvent d'origine religieuse, de plus il bénéficie du respect quasi sacramentel qui s'attache à la Constitution, interprétée du façon très restrictive, pour tenir compte prétend-on de la pensée des Pères Fondateurs. La réalité est qu'aux Etats-Unis comme ailleurs, la société dans ses profondeurs, à raison ou à tort, refuse d'évoluer. Ceci favorise le jeu des forces conservatrices qui continuent à diriger le pays.

Que prévoir et jusqu'à quel horizon?

En l'espèce, les auteurs ont choisi de juxtaposer deux types de prévisions, l'une relativement facile, portant sur l'avenir techno-scientifique, l'autre, beaucoup plus difficile, portant sur la transformation de la société en découlant et sur les conséquences juridiques appelées par ces transformations. C'est sur ce dernier aspect qu'en tant que juristes, ils concentrent leur attention. Dans l'ensemble, ils se sont fixés un horizon de 20 à 30 ans, au delà duquel l'avenir devient incertain. Quant à la société qu'ils étudient, c'est essentiellement celle de l'Amérique et des pays se développant selon son rythme. Ce faisant, ils attirent à juste titre l'attention sur le fait que, si prévoir l'avenir est difficile, ne rien prévoir du tout serait à la fois contreproductif, sinon impossible. Il faut envisager les événements les plus probables, rapportés à l'époque où il sera le plus probable qu'ils surviennent.

Le livre, par ailleurs, n'a pas les prétentions de proposer des solutions aux questions qu'il pose, mais de tenter de clarifier les situations et commencer à engager les débats qui le moment venu se traduiront pas des décisions. Le livre est divisé en deux parties. L'une porte sur les questions légales découlant des prévisions techniques qu'il formule, l'autre sur leurs conséquences en matière de pratiques productives et économiques. Cette dernière partie est particulièrement axée sur l' « *American way of life* », les difficultés qu'il aborde actuellement du fait des nouvelles technologies de communication et de la robotisation, les mesures qui devraient en bonne logique s'imposer concernant notamment l'emploi, l'éducation et plus généralement le contrat social.

Nous ne commenterons pas ici cette seconde partie, car elle rejoint des problématiques souvent discutées en Europe par ceux se préoccupent des conséquences de la mise en réseau, de la robotisation ou, dans un autre domaine, des pratiques permettant, aux citoyens par la mondialisation, d'échapper aux contraintes juridiques nationales. Les auteurs n'y ouvrent guère d'horizons nouveaux, tout au moins aux yeux de ceux qui se sont efforcés depuis longtemps en France de réfléchir à l'avenir.

Plus originaux sont les débats juridiques de la première partie. Certes, eux-mêmes se placent dans le contexte américain, marqué par exemple par les procédures accusatoires en matière pénale, s'opposant aux procédures inquisitoires fréquentes dans beaucoup de pays européens. La procédure inquisitoire est la procédure judiciaire où la maîtrise du procès est confiée au juge qui joue un rôle actif. En plus des éléments que les parties vont lui apporter, le juge pourra rechercher lui-même des éléments de preuve afin de fonder sa propre opinion – d'où l'importance du juge d'instruction en matière pénale. Dans la procédure accusatoire, en usage dans les pays anglo-saxons, le rôle des juges se limite à celui d'arbitre impartial entre les parties. Ce sont à elles, et à leurs conseils, d'apporter les preuves. Ce système favorise, en pratique, les détenteurs de revenus élevés capables de s'offrir les meilleurs légistes et experts.

De même, le livre tient compte en permanence du statut du juge, élu aux Etats-Unis et subissant de ce fait des contraintes différentes de celle d'une magistrature bénéficiant des protections du statut de la fonction publique. Mais, à quelques différences près, les problèmes à résoudre seront les mêmes.

Un fatalisme technologique

Là encore, nous ne ferons pas ici la liste des questions abordées. Bornons nous à quelques exemples. Les auteurs, à juste titre, consacrent beaucoup de temps à discuter la façon dont le droit, droit civil et surtout droit pénal, devra tenir compte des différents processus proposés par les neurosciences pour décrire les contenus des cerveaux: fMRI, relevé des pulsations cardiaques, investigation par champs magnétiques et, à terme, implants cervicaux, visualisation par ordinateur des échanges neuronaux, analyse des données en masse (big data) traitées par un individu mis en réseau. Comme nul n'en ignore aujourd'hui, le problème se pose déjà à petite échelle: peut-on étudier par des modes intrusifs la façon dont une personne réagit lors d'un procès à l'occasion de tel témoignage ou de telle interrogation. Ne risque-t-on pas de défavoriser les sujets émotifs aux dépens de ceux ayant, volontairement ou inconsciemment, un meilleur contrôle de leurs réactions?

Un autre domaine, sur lesquels ils s'étendent longuement, sera la question posée par le développement des robots, développement examiné plus en détail au chapitre 6 suivant. Non seulement, selon les auteurs, il faudra conférer une responsabilité à des robots autonomes, et pas seulement à leurs « propriétaires », mais encore il faudra accepter que des « juges robotisés » examinant en temps réel les problèmes posés, malgré leur complexité et s'appuyant pour ce faire sur toutes les ressources de l'internet, puissent remplacer les juges humains, au moins au stade de l'instruction du dossier. Mais que deviendra en ce cas l'adage de Descartes, encore admis aujourd'hui « je pense donc je suis » ?. Et comment évolueront les morales d'inspiration religieuses qui s'appuient sur la responsabilité de l'individu humain pour décider du bien et du mal.

Sur ce problème comme sur d'autres, les auteurs font preuve d'un certain fatalisme technologique. On le retrouve chez d'autres dans d'autres secteurs de la science: tout ce qui sera techniquement possible se fera, les comportements et les réglementations devront s'adapter pour en tenir compte. Nous en avons aujourd'hui un exemple dans le domaine militaire, avec le développement de systèmes d'armes capables de définir eux-mêmes leurs cibles et de prendre seuls la décision d'éliminer les éléments jugés hostiles. Après que le droit appliqué aux forces armées se soit élevé contre ces perspectives, qui se substitueraient au libre-arbitre du combattant, on peut parier que ce même droit en tiendra de plus en plus compte. On fera d'ailleurs valoir à cet égard qu'un drone robotisé sera moins susceptible d'erreurs qu'un militaire perturbé par les tumultes du champ de bataille.

Il en sera de même dans un domaine qui sera vite presque quotidien, celui des conséquences juridiques de la liberté de décision conférée à des véhicules, automobiles ou avions, capables de se passer de pilotes humains. Les auteurs voient un peu plus loin encore dans l'avenir, en examinant longuement la façon dont évoluera le droit de l'espace, quand notamment de plus en plus d'entreprises privées exploiteront les ressources de telle ou telle planète. Là aussi, ils se résignent à admettre que cette exploitation, aujourd'hui encore refusée en ce qui concerne le droit applicable à l'Antarctique, et confirmée par des textes de l'ONU concernant l'espace, ne pourra pas être empêchée. Il faudra définir de nouveaux droits territoriaux et commerciaux, au risque de ne pas pouvoir s'accorder sur eux et laisser régner la loi du plus fort. Là comme ailleurs, le désir de faire des bénéfices et accessoirement de créer des emplois, l'emportera sur toutes considérations relatives au principe de précaution.

Chapitre 6. Les robots et la robotique

Sous le terme général de robots, nous évoquerons différents développements technologiques qui s'imposent de plus en plus dans les sociétés d'aujourd'hui. L'humain traditionnel, tel que défini par les morales religieuses et laïques, depuis l'Antiquité jusqu'à au début des années 1950, y est remplacé par un humain dit « augmenté », très différent des représentations de l'homme jusque là admises. Les robots proprement dit jouent un rôle important dans cette évolution. Le domaine évolue beaucoup plus vite que ceux jusqu'ici mentionnés, physique quantique et sciences du vivant, ce qui rend la prévision beaucoup plus hasardeuse.

6.1. Introduction

Le mot Robot éveille deux images différentes. D'une part, on y voit des automates certes complexes mais incapables de subtilités et de nuances. Qualifier une personne de robot n'est pas un compliment. Il reste cependant que la plupart des processus

industriels ou de gestion feront de plus en plus appel à de tels automates. Les conséquences en termes d'emploi seront de plus en plus importantes, sans être pour autant toutes négatives.

D'autre part, le mot robot est de plus en plus utilisé pour désigner des systèmes de différentes formes, généralement humanoïdes, capables de rendre un grand nombre de services dans les sociétés modernes technologiques où les humains seront de moins en moins désireux de s'impliquer personnellement dans des tâches jugées dangereuses ou ingrates. C'est le cas de la société japonaise actuelle, société vieillissante où les besoins de services à la personne se multiplieront et où les autorités ne veulent pas encourager l'immigration de personnes provenant des pays asiatiques voisins. Un très gros effort est fait pour développer des robots « compagnons », selon le terme utilisé. Dans quelques années, l'on prévoit qu'ils seront partout, et ceci non seulement au Japon, presque aussi répandus que les automobiles aujourd'hui. Les tâches réputées les plus nobles ne leur seront pas interdites, comme dans le domaine de l'enseignement ou de la chirurgie. L'humain ne disparaîtra pas, mais il se transformera – de la même façon qu'aujourd'hui l'automobiliste est un être tout différent du cocher de fiacre.

Dans cette perspective, il est un autre domaine à considérer, moins connu parce que les recherches y sont plus confidentielles, celui des robots militaires et de sécurité. Ils sont destinés à remplacer ou compléter les combattants et surveillants humains jugés moins efficaces ou dont l'on ne veut plus aujourd'hui risquer inutilement la vie. Les drones autonomes qui ont fait beaucoup parler d'eux dans les zones tribales du Pakistan en sont un exemple. On pourrait considérer que le pilote qui à plusieurs centaines ou milliers de kilomètres croit les commander, est en fait commandé en grande partie par eux.

Cependant, ces deux définitions ne sont pas suffisantes. Les sociétés technologiques connectées, qui sont les nôtres, voient émerger des processus intelligents autonomes, que certains ont appelé des « algorithmes ». Ceux-ci s'appuient sur les ressources informationnelles désormais considérables, grands serveurs, réseaux, appareils portables distribués, pour se développer d'une façon dont l'on ne perçoit pas encore toutes les modalités, mais qui sera de plus en plus incontrôlable. Certes ce sont des humains qui au départ ont conçus et mis en oeuvre ces algorithmes, afin d'accroître leur pouvoir dans la société. Mais plus la société numérique accroît son empire, plus les processus informationnels et computationnels mis en oeuvre ont tendance à s'autonomiser. Un exemple souvent cité est celui des algorithmes de spéculation financière ou boursière. Dans le cadre de ce que l'on a appelé le trading à haute fréquence, ils peuvent en quelques secondes provoquer la ruine ou l'enrichissement de milliers de personnes. Dans la suite de cet essai, nous emploierons donc pour faire court le terme de robot afin de désigner des entités répondant aux trois définitions évoquées ci-dessus

Nous pensons que se limiter si l'on peut dire, à l'écume des mots et des images à

propos des robots risque de faire passer à côté d'un phénomène qui pourrait en dire plus sur les humains, sur les organismes vivants et sur leurs liens avec les technologies que l'on ne se l'imagine. Notre conviction profonde est qu'il ne faut pas considérer le robot en lui-même, quelles que soient ses formes, mais comme le symptôme d'une mutation profonde que subissent aujourd'hui les sociétés humaines dans leur imbrication étroite avec les technologies. Nous avons parlé de systèmes anthropotechniques, concept sur lequel nous reviendrons à la fin de cet essai.

Pour la pensée matérialiste, qui puise ses fondements dans des sociétés très anciennes, il s'agit là d'un défi. Plus que les applications de la mécanique quantique ou de la biologie artificielle, le robot, au sens élargi où nous l'entendons ici, personnifié, d'une façon encore grossière mais profondément nouvelle, les êtres mutants qui sont en train d'apparaître dans le monde, que ce soit d'ailleurs dans les pays riches ou les pays pauvres. Pour les spiritualistes, ces considérations n'ont guère de sens, car pour eux l'esprit divin transcende toutes les créations humaines. Mais les matérialistes à leur tour se méfieront de propos qui risquent d'aller dans le sens de ce qui leur est reproché. Etudier les robots n'est-il pas réductionniste, restreignant l'homme à des enjeux technologiques, faisant oublier les valeurs spirituelles qui sont indispensables à la pensée matérialiste pour répondre à une exigence fondamentale de l'esprit humain, fut-il le résultat de processus biologiques mécanistes ?

Nous pensons au contraire que le matérialisme évoluera et s'enrichira de plus en plus en considérant les robots et autres processus algorithmiques comme les messagers possibles de nouveaux regards potentiellement révolutionnaires sur le monde, ouvrant de nouveaux champs d'action eux-aussi potentiellement révolutionnaires, il y aura lieu de s'y intéresser. Ceci non seulement sur le plan scientifique et technique, mais sur le plan moral.

Ajoutons que plus les robots se perfectionnent, plus on s'aperçoit qu'ils permettent de comprendre une grande quantité de questions qui restaient mystérieuses pour les autres sciences: biologie, neurologie, psychologie, sociologie notamment. En forçant un peu l'expression, on peut donc penser que plus le robot se perfectionnera, plus il entraînera un approfondissement de la connaissance que les humains ont d'eux-mêmes et de la nature dont ils sont issus. Il pourra en résulter une convergence de fait où l'humain et le robot se développeront en symbiose, donnant naissance à des entités que la littérature d'anticipation a déjà décrit par les termes de post-humains ou de post-robots. Mais soyons prudents. Comme souvent, ces anticipations se révéleront sans doute inexactes et se seront d'autres formes et solutions encore inattendues qui verront le jour. Le propre du développement des techniques, et plus particulièrement en ce qui nous concerne ici, de la robotique, est de se faire très largement au hasard et de façon difficilement prévisible. C'est ainsi que la vie a toujours procédé, comme l'a montré Darwin. En cela la robotique est bien un des produits contemporain de l'évolution biologique qui s'est mise en place sur Terre il y a plus de 4 milliards d'années.

6.2. Description du robot

Ici, nous décrivons le monde de la robotique tel qu'il se présente en ce début d'année 2004. Dans quelques années, il sera sans doute nécessaire de modifier ces descriptions. Ce sera vrai de toutes les technologies discutées ici, mais plus particulièrement du robot.

Un organisme « presque » vivant

Il ne faut pas penser que les générations différentes d'inventeurs de robots s'étaient donné pour objectif d'imiter des organismes vivants, insectes, animaux ou hommes. Ils ont d'abord cherché à réaliser des outils répondant à certaines fonctions. C'est ensuite que l'on a découvert ce que l'on nomme les convergences. En biologie, le mot convergence désigne le fait que dans différentes espèces d'organismes vivants, soumis à des contraintes de même nature, des solutions soit semblables soit comparables ont été sélectionnées par l'évolution pour assurer les mêmes fonctions. On citera en exemple l'aile de l'oiseau, celle de la chauve-souris et celle de l'insecte. Les trois choses, des caractéristiques communes: une surface solide et légère permettant, notamment, de battre l'air avec suffisamment d'énergie pour provoquer la sustentation.

Avant d'inventer les robots, les humains ont inventé des machines de plus en plus sophistiquées, notamment des machines de guerre, dont ils ont découvert progressivement qu'elles étaient dotées de certaines solutions présentes souvent depuis des millions d'années dans le monde vivant. Le cas bien connu est celui du sonar. Un **sonar** (acronyme de **s**ound **n**avigation **a**nd **r**anging) est un appareil, utilisant les propriétés particulières de la propagation du son dans l'eau pour détecter et situer les objets sous l'eau. Or quelques années après la guerre, les biologistes ont découvert que certains animaux marins, comme les baleines à dents et les dauphins, utilisent des systèmes d'écholocation similaires aux sonars pour localiser leurs prédateurs et leurs proies. De plus, l'examen après autopsie des organes utilisés par ces animaux pour émettre et recevoir des sons a montré qu'ils ressemblaient étrangement aux dispositifs mis au point par les ingénieurs, aux différences près séparant le vivant de l'artificiel. Les mêmes convergences ont été découvertes ensuite entre les sonars aériens et les organes d'écho-location permettant à des animaux comme les chauves-souris de voler et chasser dans l'obscurité.

C'est le même phénomène qui s'est produit au cours du développement des robots. La volonté d'obtenir des performances analogues à celles de certains organismes vivants a conduit les ingénieurs à développer des solutions analogues à celles existant dans la nature, tout au moins dans la mesure où ces solutions existaient déjà et avaient été convenablement analysées préalablement. Il en est ainsi des appendices dénommés en

robotique des « effecteurs » car ils sont destinés à produire des effets. Les effecteurs permettant à certains robots de se déplacer en marchant sur des jambes artificielles ou à saisir des objets avec des mains artificielles sont souvent proches de jambes ou de mains naturelles. La **bionique** est une science qui se base sur l'étude des systèmes biologiques pour le développement de systèmes non biologiques susceptibles d'avoir des applications technologiques. Elle est de plus en plus utilisée.

Comme dans le cas cité plus haut des sonars, la bionique fonctionne dans les deux sens. On pourrait parler d'une bionique directe (imiter directement le vivant) et d'une bionique inverse (réaliser une solution non biologique dont on découvre ensuite qu'elle existe dans le vivant, ce qui permet de comprendre plus complètement le vivant. Prenons l'exemple de la locomotion appliquée aux robots. Des premières tentatives, inspirées par la bionique directe, avaient été faites pour doter les robots de jambes. On s'est aperçu que cela ne marchait pas – si l'on peut dire sans jeu de mots. Imiter une jambe ne permet pas de se tenir debout et moins encore d'avancer. Les roboticiens se sont contentés de roues et de chenilles. Néanmoins, comme les roues ne passent pas partout, ils ont repris plus tard l'idée de réaliser des robots marcheurs sur 2, 4 ou 6 jambes. Mais alors ils ont dû étudier plus en profondeur ce que personne n'avait fait vraiment jusqu'alors, comment les bipèdes biologiques tiennent sur leurs jambes. Le rôle essentiel de certains centres nerveux cérébraux dans cette fonction importante est alors mieux apparu. La réalisation de modèles artificiels relatifs à la marche a conduit à mieux comprendre, et à pouvoir éventuellement réparer, le fonctionnement des commandes neuro-motrices humaines.

C'est dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA) indispensable aux robots que ce que nous pouvons appeler la « bionique inverse » donne les résultats les plus impressionnants. L'intelligence artificielle permet aux « cerveaux » des robots de réagir et penser selon des processus très proches de ceux des cerveaux animaux voire humains. Or les informaticiens définissent des logiciels d'IA sans se préoccuper, sauf exception, de savoir comment les neurones des cerveaux biologiques se connectent entre eux pour accomplir telle ou telle fonction. Ceci parce que, pour le faire, ils devraient conduire des observations et expérimentations très complexes, réservées aux neurosciences ou sciences des systèmes nerveux et des cerveaux. Par contre, lorsqu'une solution informatique a été élaborée par des informaticiens, dans le champ propre de la recherche en IA et sans référence aux neurosciences, par exemple pour permettre à des capteurs optiques de distinguer les unes des autres les lettres de l'alphabet dans la lecture artificielle d'un texte, il arrive de plus en plus souvent que les chercheurs en neurosciences découvrent que des solutions voisines opéraient depuis des millions d'années dans les cerveaux biologiques. Mais ils n'avaient pas, avant l'IA, les références intellectuelles qui leur aurait permis de s'en apercevoir.

Enumérons les grandes caractéristiques permettant de distinguer un organisme vivant, par exemple un insecte, d'un objet matériel, qu'il s'agisse d'un objet naturel tel un caillou ou d'un objet artificiel simple fabriqué par l'homme tel un tournevis. On verra que désormais, beaucoup de ces caractéristiques se retrouvent chez le robot. Cette

convergence s'affirmera de plus en plus dans les prochaines décennies. S'y ajouteront des capacités propres au robot faisant de celui-ci un super-animal. Un insecte dispose d'un corps matérialisé par une enveloppe généralement résistante (chitine) qui enferme et protège ses différents organes. Comme ce corps ne peut en principe, du moins chez l'insecte adulte, au contraire de ce qui se passe chez la larve, survivre qu'en se déplaçant dans le monde afin notamment de s'y nourrir, il est doté de différents organes dits moteurs en robotique: pattes et pour certains insectes ailes. Mais l'insecte n'a pas seulement besoin de se déplacer, il a besoin aussi de saisir certains objets, notamment quand il s'agit de proies pour les porter à sa bouche. Il est donc doté d'organes de préhension ou préhenseurs, pinces articulées en général. Dans beaucoup d'espèces, comme chez la mante religieuse, ces préhenseurs se sont transformés en armes permettant à l'insecte de s'imposer à ses rivaux ou à se défendre d'éventuels prédateurs. Les organes moteurs et préhenseurs de l'insecte peuvent aussi être nommés des effecteurs. Ce sont eux qui permettent au corps de l'insecte d'effectuer les actions vitales nécessaires à sa survie et plus généralement à son insertion dans le monde.

Un corps, même capable de se déplacer et de saisir des objets extérieurs serait cependant à la merci de bien des dangers s'il n'était pas doté d'organes dits sensoriels en biologie ou senseurs en robotique. Les capacités sensorielles permettant l'insertion efficace dans le monde sont apparues au cours de l'évolution sans doute en même temps que les organes de la mobilité. A quoi bon, se déplacer si l'on sait où aller? Les bactéries primitives sans noyaux (procaryotes), les algues primitives à noyau (eucaryotes) avaient développé des émetteurs et des récepteurs de substances chimiques leur permettant d'identifier les sources de nourriture, comme de se reconnaître mutuellement et s'agréger en populations immenses. Les effecteurs (émetteurs et capteurs) chimiques, ou plus exactement biochimiques, restent encore une forme de communication et d'observation essentielle dans le monde vivant. Mais au fur et à mesure que les organismes se compliquaient en explorant de nouveaux milieux, l'évolution (toujours sur le mode hasard et nécessité évoqué précédemment) les a dotés de zones spécialisées du corps permettant d'appréhender et d'utiliser les différentes propriétés du monde physique. Ainsi se mirent progressivement en place, de façon adaptée au mode de vie de chaque espèce, les organes de la vue, de l'ouïe, de l'odorat et du goût. L'espèce humaine a hérité de ces divers sens. Mais, du fait de ses modes de vie récent, elle a perdu une partie de l'acuité sensorielle que les animaux ont conservé pour leur part. Certaines longueurs d'ondes, que ce soit dans le visuel ou dans le sonore, lui ont toujours échappé. Les prédécesseurs des humains n'en avaient sans doute pas le même besoin que d'autres animaux.

Les animaux ne se servent pas seulement de leurs organes sensoriel pour identifier le monde où ils vivent et s'y localiser. Ils s'en servent aussi pour communiquer. Des langages plus ou moins complexes se sont développés au sein des espèces sociales. On connaît à peu près les modes d'échanges langagiers des mammifères, mais on a découvert plus récemment ceux d'autres espèces, par exemple chez les insectes sociaux tels les abeilles et les fourmis. Grâce aux interactions permises par le

langage, ceci même lorsque ces langages paraissent très simples par comparaison avec le langage humain, les animaux construisent des sociétés qui dans une certaine mesure peuvent être considérées comme des superorganismes dont ils sont à titre individuel les cellules. Ce concept de superorganisme est très utilisé dans les sciences modernes. Il n'est pas aussi facile à définir que celui d'individu, car il correspond à un niveau hiérarchique dans l'organisation du vivant qui n'est pas aussi visible que celui de l'individu. Mais, lorsque vous employez le terme d'espèce (biologique), espèces animales ou végétales, dans le cadre par exemple d'une description de la compétition pour la survie où s'affrontent différentes espèces, vous visez en fait un type de superorganisme particulier, celui formé par l'addition de tous les animaux disposant de génomes globalement compatibles (ce par quoi l'on définit généralement une espèce).

Dès que les premiers animaux pluricellulaires se sont diversifiées, leurs corps ne se sont pas seulement trouvés dotés d'organes moteurs et sensoriels. Ils ont développé en parallèle l'équivalent de systèmes nerveux constitués de cellules spécialisées, les neurones, reliant les différents organes entre eux et assurant leur coordination. Au sein des systèmes nerveux, généralement à l'avant du corps, à la fois dans le sens de la marche et à proximité des entrées-sorties sensorielles, se sont développés des ganglions nerveux permettant de centraliser et traiter de façon que nous pourrions qualifier d'intelligente un certain nombre des informations perçues par les sens, informations provenant du milieu intérieur dite endogène et informations provenant de l'extérieur, dite exogène. Il s'est agi de l'amorce des cerveaux qui ont pris de plus en plus d'importance chez les espèces appelées à se déplacer beaucoup dans le monde et à utiliser la communication langagière entre les individus. Les cerveaux construisent de véritables modèles du monde, en élaborant des liaisons entre neurones correspondant à ce que perçoivent les organes sensoriels et à ce que vérifient les organes effecteurs. Les insectes, aussi petits qu'ils soient, sont tous dotés de systèmes nerveux et de cerveaux comportant des millions sinon davantage, de neurones.

Avons nous été complets dans la description d'un organisme vivant type, tel l'insecte que nous avons choisi comme référence, afin de mieux comprendre l'organisation anatomique et fonctionnelle d'un robot? Nous n'avons pas mentionné d'autres organes essentiels à la vie, ceux de la digestion et de la reproduction. L'oubli n'est pas très grave pour le moment, car les robots actuels se nourrissent principalement d'énergie électrique et ne se reproduisent pas, autrement qu'en atelier. Mais le problème existe. La question de l'alimentation autonome des robots de demain, comme celle de leur reproduction, au moins sur le mode de l'auto-réparation, du clonage ou de l'impression 3D, est déjà posée. Des solutions inédites s'imposeront prochainement d'elles-mêmes.

Un vivant « augmenté »

Des technologies en plein développement sont de plus en plus mises à contribution

pour rendre les robots performants, dans les trois domaines essentiels des organes sensoriels, des organes moteurs et des organes de la cognition. Nous nommons organes de la cognition ou de la connaissance ceux permettant d'acquérir des représentations du monde. Dans ces trois domaines, les robots disposent maintenant et disposeront de plus en plus d'outils qui pourront les rendre largement supérieurs aux animaux et aux humains. La raison en est que rien n'empêche en principe d'équiper les robots des moyens technologiques en constant progrès résultant du progrès lui-même accéléré et convergent des sciences et des techniques civiles et militaires.

Cette accélération et cette convergence, indiscutables, même si on peut discuter le rythme selon lequel elles se produisent, peuvent conduire dans un relativement court délai à une situation nouvelle. Subitement, toute une série de limites auxquelles se heurtaient séparément les diverses sciences et technologies disparaîtront. Des champs presque illimités de découvertes s'ouvriront. La robotique en donne un excellent exemple. Ray Kurzweil, père du concept de Singularité, évoqué précédemment, et qui officie désormais dans l'état-major de Google (il ne s'agit pas d'un hasard) a ainsi expliqué qu'avec la miniaturisation des composants électroniques et l'abaissement de leurs coûts, il sera dans quelques années possible d'installer dans un volume n'excédant pas la taille du disque dur d'un ordinateur, et pour le même prix, plus de cent milliards de composants, c'est-à-dire autant que le cerveau compte de neurones. Par ailleurs, les neurosciences observationnelles (celles qui, comme l'imagerie cérébrale fonctionnelle, observent et comprennent progressivement le fonctionnement des neurones) ayant dans le même temps fait elles-aussi des progrès exponentiels, il sera en principe devenu possible de mettre ces cent milliards de composants en état de simuler le cerveau humain, voire de fonctionner d'une façon améliorée par rapport à celle qui est la sienne naturellement. Des robots dotés de telles capacités d'intelligence deviendront alors vraiment des compétiteurs sérieux. Les mêmes progrès accélérés et convergents marqueront évidemment aussi leurs différents organes sensoriels et moteurs. Dans les 10 à 15 ans, deux grands projets, l'un américain, l'autre européen (Human brain projects) visent à réaliser un cerveau artificiel tout en comprenant mieux ce faisant le fonctionnement du cerveau biologique.

C'est en gardant ces considérations à l'esprit que nous pouvons jeter un rapide coup d'oeil sur les différents organes caractérisant un robot moderne. Nous avons indiqué précédemment que les organismes vivants, du plus petit au plus grand, sont d'abord identifiable par leur corps, c'est-à-dire l'enceinte fermée rassemblant leurs organes internes et externes. En ce qui concerne les robots, l'expérience montre qu'en fonction des rôles qui leur sont assignés aujourd'hui, ils peuvent adopter des corps aux formes les plus diverses. Les uns, correspondant au mieux à l'archétype du robot dans l'imagination populaire, ressemblent plus ou moins à des animaux, voire à des humains, avec des corps, des membres, des organes sensoriels généralement portés par une tête. Même si la ressemblance est parfois lointaine, ceux qui interagissent avec eux ne s'y trompent pas, si grande est l'empathie avec des organismes fussent-ils

artificiels donnant l'impression d'être proches de l'humain.

D'autres robots, dont le rôle social ne sera pas moindre, sont conçus principalement en vue de leur efficacité: chaises ou membres robotisées pour handicapés, robots en forme de reptiles pour explorer des champs de ruine à la suite d'un tremblement de terre ou d'une explosion, robots d'exploration marins ou aériens, en forme de poisson, d'oiseau ou d'insecte...

Un grand nombre de robots ne se présentent pas du tout comme des robots, mais comme des machines ordinaires, dotées pourtant d'organes et de fonctions robotiques dont sont privées les machines courantes. C'est le cas des robots de laboratoire, en cours de développement, pour lesquels on ne s'embarrasse pas de définir des formes anthropomorphes. C'est le cas aussi des robots utilisés par la défense et la police dans un nombre croissant de pays. Ils sont souvent incorporés dans des véhicules terrestres, aériens et maritimes (dont les drones précités), capables de se passer de plus en plus d'interventions humaines. Dans l'industrie ou dans les hôpitaux, où les robots sont de plus en plus nombreux, ils s'intègrent dorénavant aux chaînes de production et de soins, depuis longtemps d'ailleurs automatisées.

Ceci dit, rien n'oblige à donner aux corps des robots des formes proches de celles d'un animal ou d'un homme. Le corps du robot n'est pas limité comme celui des organismes vivants par des barrières anatomiques infranchissables. Il peut prendre toutes les formes imaginables, celles du moins que la technique du moment lui permettent d'explorer. On emploie de plus en plus le terme de micro-robots pour désigner des robots d'une taille de quelques millimètres susceptibles d'être implantés dans les organismes vivants pour pallier certaines de leurs insuffisances. On expérimente par ailleurs des robots dits répartis, dont les différents organes, capteurs, effecteurs, sont situés dans des lieux distants les uns des autres, parfois de plusieurs mètres voire de kilomètres. Dans des environnements de grande étendue difficiles à observer directement, ces robots pourront se regrouper, comme les insectes sociaux, en essaims, ils constitueront de nouveaux systèmes robotiques de grande taille. A plus petite échelle encore, on expérimente des nanorobots regroupés en nuages. Il s'agit de composants électroniques sub-millimétriques (dits parfois « poussière intelligente ») fonctionnant en réseau sur de vastes espaces, et pouvant s'organiser aussi bien en unités centrales qu'en appendices sensoriels. L'essentiel en ce cas est que la liaison entre les organes, correspondant au système nerveux de l'animal, soit correctement assurée.

Très différents, au moins « anatomiquement », sont les « robots virtuels ». Il s'agit de robots composés d'instructions ou agents informatiques (nous avons utilisé plus haut le terme d'algorithmes, terme un peu réducteur mais parlant bien l'imagination), ceux-ci sont déployés sur des mémoires d'ordinateurs ou de serveurs, comme sur des réseaux numériques. Ils sont donc invisibles aux regards. En grand nombre désormais, ils déterminent en grande partie, à l'insu des utilisateurs finaux, ce que l'on peut appeler la police et l'exploitation du web, voulues par certains pouvoirs ou

se mettant en place spontanément.

Tout aussi potentiellement nombreux et divers sont les organes sensoriels dont sont ou peuvent être dotés les robots. Cela tient à ce que les sciences et les techniques améliorent constamment les moyens d'observer le monde, en s'affranchissant des limites imposées par la biologie. Ce sont plutôt des contraintes pratiques qui obligent à restreindre les capacités sensorielles mises à la disposition des robots. Comme ceux-ci, dans la plupart des applications, doivent être mobiles et relativement bon marché, les ingénieurs ne cherchent pas pour le moment à les doter d'appareils encombrants ou trop coûteux. Néanmoins, comme la miniaturisation et la diminution des coûts jouent là comme partout, de plus en plus de robots emploient par exemple des systèmes sensoriels et de communication fonctionnant dans l'infra rouge et l'ultra-violet, ou dans l'infra-son et l'ultra-son, bien au delà des gammes accessibles aux humains. Rien n'empêche non plus de les doter systématiquement d'instrument modernes tels que le GPS pour se situer dans le monde. D'une façon générale, toutes les applications « intelligentes » pour mobiles dont peuvent désormais être dotés quasi gratuitement les téléphones, caméras et ordinateurs portables sont à la disposition des concepteurs de robots. Les robots peuvent les utiliser sans s'élancer, jour et nuit, ce qui n'est pas le cas des humains.

L'encombrement et le coût des grands instruments scientifiques d'observation du monde ne sont d'ailleurs que des freins relatifs à l'augmentation des possibilités sensorielles des robots. Rien n'empêche en effet de les connecter, par l'intermédiaire de réseaux de télécommunication ou de radiocommunication, avec des observatoires distants. On pourrait très bien imaginer, par exemple, qu'un robot supposé piloter des activités agricoles puisse se connecter en temps réels à des satellites météorologiques; de la même façon et même mieux que ne le ferait un opérateur humain. Nous ferons la même observations quand nous examinerons les données à la disposition des cerveaux des robots. L'immense réservoir des données du web est désormais à leur disposition.

Nous avons indiqué plus haut, à propos des insectes, qu'ils disposaient, malgré leurs petites tailles, de systèmes nerveux et de cerveaux capables d'assurer leur coordination générale et leur adaptabilité à un monde extérieur susceptible de changer. C'est évidemment aussi le cas en ce qui concerne les robots. Les composants électroniques qui servent de support à leurs activités nerveuses sont les mêmes que ceux désormais universellement utilisées, soit dans les calculateurs proprement dits, soit dans tous les dispositifs de la vie courante dotés de puces informatiques. Il s'agit de microprocesseurs échangeant des données par l'intermédiaire de programmes informatiques, c'est-à-dire grâce à des processus calculatoire permettant aux systèmes d'accomplir les fonctions qui leur sont assignées. Des puces sont désormais implantées partout, y compris sous la peau de certaines personnes volontaires. Elles communiquent par l'intermédiaire de réseaux de télécommunication ou de radiocommunication présents également presque partout, tout au moins dans les pays raisonnablement développés. Il en résulte que les objets possédant un minimum de

mémoire électronique peuvent désormais s'organiser plus ou moins spontanément (non décidée par un grand planificateur central) et communiquer dans le cadre d'un nouveau type de web que l'on nomme l'Internet des objets. Un réfrigérateur de cuisine doté d'une puce mesurant l'état de ses réserves alimentaires peut ainsi alerter l'ordinateur de la maison afin que celui-ci passe automatiquement un ordre de réapprovisionnement. La maison, la ville, la société toute entière et tous les citoyens connectés tendent de cette façon à se transformer en systèmes robotiques plus ou moins répartis et, diront certains, plus ou moins envahissants. On fait beaucoup valoir les risques de télé-surveillance à la portée d'éventuels Big-Brothers policiers ou commerciaux. Mais pour le moment, les usagers apprécient plus les services rendus que les risques.

Ce qui intéresse et parfois inquiète plus particulièrement l'opinion, plutôt qu'une robotisation progressive de la société à laquelle elle demeure peu sensible, concerne les capacités réflexive des robots, c'est-à-dire leur aptitude à se comporter d'une façon que nous considérons comme intelligente, en faisant preuve le cas échéant d'un minimum de conscience de soi. Une question de plus en plus posée, dans les sociétés où les robots sont déjà nombreux, comme au Japon ou aux Etats-Unis, concerne les relations que pourront entretenir avec les humains des robots, non seulement dotés d'organes sensoriels et moteurs éventuellement bien plus performants que les nôtres, comme nous venons de le voir, mais d'intelligences approchant progressivement soit celles des animaux, soit les nôtres. Resteront-ils des serviteurs ou des commensaux? Deviendront-ils des concurrents ou des ennemis? Ces points importants méritent sans attendre quelques précisions. Pour cela, il faut présenter rapidement les processus permettant aux robots d'acquérir des connaissances, ce que l'on qualifie généralement de processus cognitifs.

L'acquisition de connaissance chez les robots

Le cerveau artificiel du robot et plus généralement son système nerveux font partie de son corps, évidemment, mais vus leurs rôles spécifiques dans la maîtrise coordonnée du système et dans la prise de conscience qu'il aura de lui-même, il convient de les traiter à part. Le corps robotique, quelle que soit sa sophistication technologique, tire ses qualités de la puissance de son unité centrale de commande, organe correspondant au cerveau des vertébrés. Son cerveau artificiel utilise des Intelligences Artificielles plus ou moins performantes, du type de celles développées dans toutes les machines et systèmes informatiques modernes. On désigne par Intelligence Artificielle une forme d'informatique développée dès les premières années d'apparition des calculateurs électroniques, dans les années cinquante du 20^e siècle. Il s'agit d'utiliser des outils d'ailleurs simples et connus de tous les débutants en analyse-programmation, afin d'accomplir les fonctions les plus complexes de l'intelligence humaine.

Cette ambition, affichée sans complexe par les premiers spécialistes américains, se

révéla vite hors de portée, compte tenu des médiocres performances des calculateurs. Mais au delà des insuffisances de ceux-ci, les difficultés de l'IA mirent en évidence le fait que nous avons déjà évoqué plus haut, à propos de la convergence: les scientifiques connaissaient mal, même lorsqu'ils s'en prétendaient experts, les processus de fonctionnement des cerveaux, qu'ils soient animaux ou humains. Ainsi, la compréhension du langage par un programme informatique et à plus forte raison la traduction informatique échouèrent parce que les connaissances en linguistique de l'époque ne permettaient pas de comprendre comment le cerveau s'y prenait pour réaliser les tâches les plus élémentaires de la communication langagière. Nous reviendrons sur ces questions ultérieurement. Aujourd'hui encore, les logiciels de traduction affichent de médiocres performances. Les améliorer devrait être une priorité pour le dialogue entre les nations.

Le rêve d'une IGA (Intelligence Générale artificielle) fut ainsi momentanément mis de côté, au profit de celui plus modeste d'IAG (Intelligence Artificielle Générale). La différence échappera peut-être, mais elle est fondamentale. L'Intelligence générale est supposée correspondre à celle de l'homme. Il n'a pas paru possible d'en doter des robots, au moins jusqu'à ces derniers temps. Les choses changeront sans doute bientôt, comme nous le verrons. Mais la robotique actuelle n'en est pas encore à ce stade. L'Intelligence Artificielle au contraire est faite de centaines de processus et recettes simulant des comportements élémentaires des animaux supérieurs et des humains. Il est toujours possible d'en faire des catalogues généraux et de les rassembler en plus ou moins grand nombre au profit de calculateurs ou de robots. C'est ce à quoi vise l'IA, y compris sous sa forme la plus généralisée.

Le concepteur d'un robot pourra alors puiser dans le catalogue (général) des produits contemporains de l'IA afin d'en extraire ceux qui conviendront le mieux au rôle assigné à ce robot. Le site informatique de l'Association Française d'Intelligence Artificielle en propose de nombreux exemples. Les logiciels de reconnaissance du visage ou de la voix, utilisé par certaines entreprises pour filtrer les visiteurs, font ainsi appel à des solutions informatiques parfaitement transposables au niveau de tel ou tel robot, pour lui permettre d'identifier ceux à qui il s'adresse. Dès et déjà un robot armé d'un certain nombre de ces logiciels d'IA peut se comporter dans la vie courante d'une façon qui le fera considérer comme particulièrement intelligent, au moins autant tout au moins qu'un animal domestique tel le chien.

Le cerveau du robot est généralement constitué d'un ou plusieurs ordinateurs, les plus gros ne dépassant pas la taille d'un PC du commerce actuel. Ils seront de plus en plus répartis et travaillant en réseau à l'intérieur du corps, unique ou lui-même réparti, du robot. Nous l'avons indiqué, la miniaturisation et l'augmentation de puissance continue des composants électroniques laisse entrevoir le temps où des robots peu coûteux seront dotés d'autant de neurones artificiels que les cerveaux animaux sont dotés de neurones biologiques. Mais ils ne seront pas intelligents pour autant, si des IA performantes ne se développent pas sur ces réseaux physiques et surtout si le mystère que demeure encore pour beaucoup de cognitivistes

L'Intelligence Générale humaine n'est pas éclairci.

Les robots entièrement programmés et donc asservis seront de moins en moins nombreux, car leur coût est devenu prohibitif, aussi bien en écriture initiale qu'en maintenance. On ne les conservera que dans les machines ne tolérant qu'une infime marge d'erreur. Même en ce cas, les bugs inévitables en informatique et l'impossibilité factuelle d'en détecter rapidement la cause prohiberont vite de telles solutions. Partout, l'auto-diagnostic, l'auto-maintenance et l'auto-développement se généraliseront, conduisant à la banalisation des propriétés d'évolution sur le mode expérimenté par la vie dès son apparition il y a plus de 4 milliards d'années. .

Cependant, il y aura plusieurs types de robots évolutionnaires. Les premiers et les plus répandus seront ceux dont les capacités d'évolution seront « contraintes » dès la conception initiale par des limites fixées à l'avance. Les humains accepteront que leurs esclaves robotiques disposent d'une certaine liberté, mais ils ne voudront pas leur en donner trop. C'est déjà le cas en ce qui concerne les robots militaires. Ils sont dotés d'un certain degré d'autonomie, leur permettant par exemple d'identifier des cibles et de proposer des objectifs à l'officier de tir qui reste en liaison avec eux à distance. Mais en général, afin d'éviter les « pertes collatérales » qui font beaucoup de mal à la popularité des armées modernes au sein des populations civiles, on a convenu que l'ordre de mise à feu sera réservé à l'élément humain du système, c'est à dire à cet officier. Tout laisse à penser cependant que ces précautions seront progressivement allégées si les adversaires des armées robotisées devenaient plus agressifs et dangereux. Dans ce cas, il ne fera pas bon d'être un innocent pris dans le capteur optique et dans le système autonome de prise de décision équipant un robot militaire jouissant d'une large liberté dans l'appréciation des conditions exigeant l'ouverture du feu.

A l'inverse, dans les laboratoires ou dans les entreprises privilégiant l'innovation et le bouleversement des idées reçues, une autonomie aussi complète que possible sera considérée comme une qualité à rechercher, voire à privilégier. De tels robots présenteront certes des risques potentiels, mais c'est le propre de toute technologie réellement innovante. Il serait aussi aberrant de refuser l'autonomie aux robots du futur que de refuser de communiquer avec des extraterrestres, si certains d'entre eux nous faisaient la grâce de nous visiter.

Mais comment le robot autonome d'aujourd'hui, fut-il très limité en autonomie, procédera-t-il pour se doter de formes de pensées et de comportements qui ne soient pas programmés à l'avance par les ingénieurs. Il procédera comme le font les animaux les plus simples, dès qu'ils disposent d'un système nerveux central reliant leurs organes sensoriels et moteurs. Il utilisera des applications d'IA élémentaires pour construire par apprentissage des associations stables entre les informations recueillies en entrée à partir de ses organes sensoriels et moteurs. Il les mettra ensuite à l'épreuve de l'expérience en utilisant ces mêmes organes en terminaux de sortie. Il ne retiendra que les hypothèses vérifiées par l'expérience.

Prenons l'exemple d'un robot explorant son laboratoire. A la suite d'expériences précédentes, il aura mémorisé le fait que, dans toutes les directions, celui-ci est composé de murs infranchissables, c'est-à-dire devant lesquels il doit s'arrêter ou changer de direction. S'il identifie en se déplaçant à l'intérieur de cette enceinte un obstacle nouveau, moins opaque qu'un mur, par exemple un pied de tabouret, il ira logiquement se heurter à lui. Si ce faisant il pouvait déplacer le tabouret, son modèle du monde s'enrichirait. Le modèle comporterait des obstacles infranchissables et de obstacles susceptibles d'être déplacés. Le robot adaptera en conséquence ses différents itinéraires. Au bout de quelques jours d'essais et erreurs, mobilisant toute la gamme des capteurs et effecteurs dont il dispose, le robot se sera donné une image fort complète de son laboratoire, lui permettant d'y naviguer avec pertinence. C'est un peu de cette façon d'ailleurs que procèdent les personnes aveugles confrontées sans aides extérieures à des milieux nouveaux.

Les informations émises et reçues par les organes corporels du robot, convenablement corrélées en fonction des retours d'expérience, peuvent ainsi construire dans son cerveau de véritables univers. Ils comporteront des détails indispensables à la survie du robot, aussi bien triviaux (par exemple la représentation d'un pied de table, celle de la prise de courant à laquelle recharger ses batteries) que subtils et peu observables par l'homme (la lecture et l'interprétation d'une émotion passagère sur le visage de l'humain avec lequel il travaille). Comme évoqué ci-dessus, les robots autonomes de l'avenir présenteront le grand intérêt de se doter de représentations du monde dont les humains n'auraient pas eu l'idée et qui leur seront très utiles, comme le seraient les représentations du monde proposées par des visiteurs extraterrestres .

On voit que ce faisant, les robots autonomes font preuve d'inventivité, Plus encore, ils font preuve d'un véritable esprit scientifique. Celui-ci repose sur un processus simple, malheureusement peu respecté par ceux qui se disent scientifiques mais remplacent la méthode expérimentale par l'idéologie. Le scientifique élabore des hypothèses sur le monde, soit à partir de ce qu'il croit déjà savoir de celui-ci, soit d'une façon plus ou moins aléatoire (ce que le grand philosophe des sciences trop tôt disparu Paul Feyerabend avait nommé l « anarchisme scientifique ». Ces hypothèses sont ensuite mise à l'épreuve de l'expérience. Celles qui ne sont pas vérifiées expérimentalement sont oubliées. Les autres sont conservés, au moins momentanément. Elles vont enrichir le vaste ensemble des connaissances scientifiques reconnues comme telles par la communauté mondiale des chercheurs.

On doit noter que ces procédures rigoureuses ont été, longtemps avant que ne s'affirme l'universalité de la science moderne, pratiquées par la recherche scientifique empirique. La recherche empirique n'est pas le monopole des humains. On peut considérer que tous les animaux, à des titres divers, acquièrent selon des méthodes identiques les connaissances dont ils ont besoin pour survivre dans le monde. Ils le font soit au niveau de l'espèce (les connaissances acquises s'exprimant alors dans le

langage des gènes commandant les comportements de survie) soit au niveau des individus. Les connaissances s'échangent alors et se transmettent souvent par des prélangages et surtout par des comportements soumis à imitation, dans le cadre de ce que l'on nomme les cultures animales.

Les robots évolutionnaires procèdent très exactement de la même façon. Ils ne se contentent pas à construire des images du monde à partir des informations reçues de leurs divers capteurs sensoriels. Ils formulent des hypothèses sur ce monde s'appuyant sur les représentations qu'ils en ont et les testent en utilisant leurs organes effecteurs. Nous avons déjà évoqué le robot qui se construit une cartographie en 3D de son laboratoire. Mais plus spectaculaire est (ou sera) l'exemple du robot explorant la planète Mars, dont il ne possède pas encore de cartographie précise. Ainsi il s'avancera jusqu'à un obstacle (celui par exemple d'un mur de falaise) dessiné dans son cerveau par les échos optiques ou radar recueillis par ses capteurs. Il aura à la suite d'expériences précédentes pu vérifier l'influence d'un objet de ce genre sur sa progression. Au cas où des murs analogues l'auraient arrêté, l'information correspondante aurait été mémorisée, ce qui lui permettra d'éviter l'obstacle à l'avance, sans même aller se heurter à lui. Tous les obstacles de même nature (de même classe) seront à l'avenir contournés. Si par contre, les obstacles visualisés et expérimentés se révèlent faciles à escalader, le robot n'en tiendra pas compte. Par essais et erreurs se construira donc dans le cerveau du robot une représentation de plus en plus complète de l'univers martien proche. L'intérêt de l'autonomie résidera dans le fait que le robot ne sera pas obligé de demander en permanence l'autorisation de faire ceci ou cela à son centre de contrôle terrestre, situé à trente minutes lumière de lui.

Mais la prudence imposera, particulièrement dans le cas des robots d'exploration spatiales qui représentent des enjeux scientifiques et budgétaires considérables, que le robot ne prenne pas de risques. Face à une rupture de pente, pouvant entraîner une chute et une incapacité définitive, le robot aura appris précédemment à ne s'engager que dans des pentes dont il aura déjà expérimenté le caractère anodin. S'il détecte un vrai précipice, ou bien il s'arrêtera, ou bien il demandera des instructions à la Terre concernant la démarche à suivre. Les sondes d'accompagnement ou orbiteurs d'origine terrestre tournant au dessus de lui pourront alors transmettre à la base des vues du précipice identifié et rapporter au robot les instructions adéquates. Celles-ci seront mémorisées et permettront ultérieurement au robot de faire face seul à de telles situations.

Le contenu des cartographies construites par le robot à la suite de son exploration de plus en plus autonome du monde représentera pour lui la « vérité » du monde, défini par les « lois » exprimant les relations entre les entités de ce monde, inconnues en soi, et leurs interactions avec les organes du robot. Si ces lois expriment des constantes souvent rencontrées, elles constitueront progressivement le corpus de références « scientifiques » sur lequel s'appuiera le robot pour distinguer entre les bonnes et mauvaises hypothèses, appréciées au regard de ses chances de

fonctionnement efficace sinon de survie.

Tout ceci paraîtra trivial. Nous l'avons dit, le moindre animal doté d'un rudiment de système sensori-moteur fait de même. Pour les robots, il s'agit pourtant d'une véritable nouvelle dimension que les plus sophistiqués d'entre eux sont en train d'acquérir, sous l'impulsion d'humains qui font confiance à cette approche. Ces derniers sont encore rares. Ceci tient à ce que, répétons-le, les concepteurs des robots n'aiment pas concéder trop de liberté à leurs esclaves. L'exploration de Mars par les robots américains Spirit et Opportunity, aux résultats par ailleurs remarquables, s'est faite sous un contrôle permanent de la Terre. Comme les communications mettent, nous l'avons dit, plusieurs dizaines de minutes pour parcourir la distance entre celle-ci et Mars, on ne pouvait pas attendre des « rovers » beaucoup de réactivité. La crainte de voir des engins coûteux échapper à leurs contrôleurs terrestres était à l'époque trop grande. Mais la confiance grandissante mise dans la fiabilité des capacités d'auto-gestion des futurs orbiteurs, atterrisseurs et robots d'exploration fait qu'aujourd'hui, les nouvelles générations de tels engins sont conçues comme des systèmes robotiques autonomes. Le contrôleur à terre ne reprendra la main qu'en cas de difficultés inattendues. C'est ainsi qu'un système robotique extrêmement performant permet au « camion de l'espace », l'ATV, conçu par l'Agence spatiale européenne, pesant plusieurs tonnes, de quitter son lanceur et se verrouiller à quelques millimètres près sur la Station spatiale internationale sans intervention de l'équipage de celle-ci. On devine cependant qu'une veille attentive est maintenue, afin de reprendre la main sur les automatismes aussi intelligents soient-ils. Une erreur d'approche toujours possible entraînerait la perte de l'ISS.

Les cerveaux des robots autonomes de demain seront-ils capables d'inventer véritablement ? Techniquement, la réponse sera affirmative. Les bases de connaissances dont se sera doté le robot permettront de susciter de nouvelles explorations par essais et erreurs générées non seulement par le fonctionnement aléatoire du corps, si celui-ci fait partie des spécifications fonctionnelles du robot, mais par un mécanisme d'induction qu'il est facile d'organiser à l'avance et qui pourra se généraliser spontanément au sein du robot en cas de succès. Le robot, autrement dit, formulera des hypothèses s'appuyant sur ses bases de connaissance, les soumettra à des tests pratiques et les modifiera en fonction des retours d'expérience. Mais pourquoi, dira-t-on, le ferait-il ? De telles démarches sont nécessairement coûteuses en temps et énergie. Darwin nous donnerait la réponse à cette question, qu'il s'était posée à propos des animaux. Le robot n'innovera pas parce qu'il sera programmé à l'avance pour le faire. L'innovation ne se programme pas. Il n'innovera (et ne se transformera en conséquence) que si la concurrence avec d'autres entités lui disputant l'accès aux ressources dont il se nourrit l'oblige à le faire. Mais comment cette concurrence pourra-t-elle s'organiser ?

Vers les langages et la conscience

Les roboticiens intelligents étant tous darwiniens, ils ont bien compris que la capacité d'acquisition de connaissances propre à un robot isolé sera bien moindre que celle obtenue par une société de robots interagissant ensemble. Les conditions les plus favorables à l'innovation naissent des pressions de sélection naissant au sein de cette société, par exemple à l'occasion d'une concurrence pour l'accès à des ressources rares. La première des innovations qu'acquiert des robots sociaux se traduit par une amorce de conscience de soi. Les études sur l'acquisition de la conscience de soi par les robots montrent comment progressivement un robot portant son attention sur un homologue avec lequel il interagit apprend progressivement la logique du comportement de celui-ci (théorie de l'esprit) puis se l'applique à lui-même en apprenant à s'observer lui aussi de l'extérieur.

Après la conscience de soi vient le langage. Si ces robots sont placés dans un environnement sélectif leur imposant de coopérer pour survivre, ils utiliseront leurs organes d'entrée/sortie pour élaborer des messages leur servant à échanger des informations (par exemple, « alerte, voici un robot prédateur »). Ces échanges se simplifieront et se normaliseront à l'usage, ce qui donnera naissance à un proto langage commun, constitué de concepts et de syntaxes.

Dès qu'ils auront acquis ce langage, ils l'utiliseront pour échanger et normaliser, toujours sur le mode darwinien, leurs contenus de connaissances individuels. Une base de connaissance collective « robotique » (c'est-à-dire n'ayant en premier ressort d'intérêt que pour faciliter leur propre adaptation) sera progressivement élaborée. Les robots feront appel à elle quand leurs connaissances personnelles se révéleront insuffisantes. Développées et confirmées par des essais et erreurs collectifs, ces bases équivaldront aux connaissances, empiriques puis scientifiques, accumulées par les humains. Tout ceci a été amplement démontré par divers programmes de recherche.

Rien n'empêcherait évidemment les humains d'utiliser ces bases de connaissances pour enrichir les leurs propres, voire de s'inspirer des processus d'acquisition des connaissances mis en œuvre par les robots (surtout s'ils sont dotés d'organes sensoriels et effecteurs particulièrement sophistiqués) afin d'améliorer les leurs. C'est ainsi qu'à l'avenir, des robots pourront remplacer très efficacement certaines catégories de chercheurs scientifiques, ceux-ci se réservant pour les tâches plus complexes. D'ores et déjà, dans l'interprétation des données multiples provenant des nombreux satellites d'observation de la Terre, des océans et de l'atmosphère, le recrutement de robots inventeurs est en cours d'expérimentation.

Mais pour le moment, si les robots évolutionnaires sont capables d'une certaine autonomie, par rapport aux instructions précédemment chargées dans leur mémoire ou, pour ce qui concerne les robots spatiaux, par rapport aux ordres envoyés par la station de contrôle, ils ne sont pas capables d'inventer véritablement des

performances analogues à celles des êtres humains, dans le domaine de l'adaptation rapide aux changements et de la résolution de problèmes. A plus forte raison ils ne sont pas capables d'inventer des comportements nouveaux, créer des outils et moins encore d'éprouver des affects. D'une façon générale, on dira qu'ils ne sont pas capables de penser. Leurs performances, bien que déjà très remarquables, n'atteignent même pas celle des animaux de laboratoire, tels le rat ou la souris.

Pour les usages commerciaux ou militaires les plus courants, ces performances sont généralement considérées comme suffisantes. Or nous l'avons dit, les concepteurs de robots veulent depuis déjà quelques années obtenir des systèmes capables de se comporter véritablement « comme s'ils » étaient des hommes. Les concepteurs de robots domestiques ou de compagnie, principalement japonais, visent à produire des systèmes capables de remplacer en tous points les aides soignants ou les auxiliaires domestiques. Les concepteurs de robots pour l'exploration spatiale ou les applications militaires, généralement américains, visent à obtenir des systèmes aussi performants, sinon davantage, que des astronautes ou des combattants humains. Les capacités d'intelligence adaptative des robots ne peuvent donc que se développer très vite.

Deviendront-ils pour autant conscients? Il s'agit de ce que certains ont nommé le Graal de la science moderne. Les processus décrits ci-dessus peuvent se dérouler sans que les robots individuels ne développent une conscience supérieure analogue à celle des humains. Leur conscience pourra se limiter à ce que l'on nomme la conscience primaire chez l'animal. La conscience primaire est celle qui permet à un animal de réagir utilement lorsque, par exemple, un danger quelconque menace son intégrité. Tout organisme, vivant ou artificiel, disposant d'un corps, de capteurs et d'un système nerveux coordonnateur, génère des consciences primaires plus ou moins performantes.

Ceci étant, une conscience de soi ou conscience supérieure artificielle offrira aux robots des avantages supplémentaires. Ce seront en principe les mêmes que ceux de la conscience humaine : proposer une vision globale du monde, incluant le sujet, génératrice d'une meilleure adaptation. Cette conscience disposant de mémoires des expériences passées étendues pourra générer des projections de conduite pour le futur qui éviteront au robot de s'avancer dans le monde tout à fait en aveugle. Il n'existe pas à notre connaissance de trace de conscience de soi supérieure chez les robots actuels, au moins sous une forme apparue spontanément. Il est évidemment possible de programmer des comportements conscients de type supérieur. Mais cela n'aurait qu'un faible intérêt en ce qui concerne la réflexion sur l'apparition des processus dits conscients dans la nature. ,

Pour être complet, nous nous devons de signaler qu'un certain nombre de programmes visent actuellement à réaliser de véritables consciences artificielles, implémentables chez des robots.

Dans certaines des solutions à l'étude, la conscience de soi sera progressivement

acquise par l'intermédiaire de capteurs dirigés vers l'intérieur du système, qui en dresseront en permanence l'état. Cet état, dès son élaboration, modifiera par feedback le comportement des unités d'entrées et de sorties interagissant avec le monde. Ces nouvelles interactions généreront à leur tour un nouvel état global du système lequel, observé modifiera à nouveaux les processus d'entrée-sortie, ceci à l'infini.

L'évolution vers des consciences artificielles est hautement probable. Mais la question est trop complexe pour être abordée ici. La portée pratique, mais aussi l'importance scientifique et philosophique de telles réalisations, seront on le devine considérables. On ne peut que regretter le manque de moyens budgétaires dont elles souffrent, au moins en Europe et dans le monde universitaire civil.

5.2. Futures applications de la robotique

Nous avons fait sommairement allusion à certaines de celles-ci dans les sections précédentes. Il est bon d'y revenir plus méthodiquement.

La plupart des auteurs sérieux qui étudient les perspectives de la robotique confirment que celle-ci prendra une place de plus en plus grande dans nos sociétés, quelles que soient les contraintes économiques et sociales du prochain demi-siècle. Il est très probable que l'on verra les robots remplacer aussi bien les machines actuelles que les hommes dans la plupart des tâches industrielles. Par ailleurs, ils interviendront systématiquement dans les activités de service et de loisirs. Enfin et surtout, ils joueront un rôle prépondérant, en association avec les humains ou même sans eux, dans les programmes de sécurité défense et d'exploration des milieux hostiles, notamment ceux de l'espace. Nécessairement, de ce fait, leurs relations avec les humains se modifieront profondément. Nous nous interrogerons au terme de cette étude sur la nature de ces relations. Les robots et les humains seront, dans les sociétés ayant accepté le tournant de la robotisation, étroitement imbriquées dans ce que nous avons nommé par ailleurs des systèmes anthropotechniques, c'est-à-dire des ensembles où les hommes et les techniques s'interpénètrent si étroitement que leurs frontières biologiques et matérielles en viennent à se confondre, au moins partiellement ou momentanément. .

Existera-t-il encore des sociétés qui refuseront les technologies robotiques, par idéologie, ou qui ne pourront pas les aborder, par pauvreté ? Une autre question d'importance concerne les prélèvements sur les ressources mondiales rares nécessités par la fabrication de centaines de millions de dispositifs robotisés. Ces derniers ne resteront-ils pas le privilège de quelques favorisés. Il s'agit de questions de type géopolitique qu'il faudra évoquer également.

Si nous faisons le recensement des domaines où les robots interviendront, directement ou indirectement, dans la vie des humains au cours des prochaines décennies, nous voyons que, sauf interruption accidentelle de la tendance actuelle, il

n'existera pratiquement pas de secteurs ou d'activités leur échappant.

Les corps biologiques « augmentés »

Depuis la nuit des temps, les hommes n'ont pu survivre et se développer dans les milieux qu'ils exploraient ou qu'ils se créaient eux-mêmes qu'en se dotant de techniques de plus en plus loin des capacités d'un corps biologique non transformé. Les vêtements, les habitats, les véhicules, les moyens de communication représentent des concentrés de technologies innovantes accumulées au cours des âges. Depuis un demi siècle, la révolution scientifique et technique a profondément modifié les outils et leurs usages. Le citoyen de la cité moderne, relié au monde entier par des réseaux de communications numériques, équipé de prothèses médicales performantes, est considéré comme un extraterrestre par les rares survivants des sociétés rurales traditionnelles.

Il faut bien voir que les progrès apportés par la robotisation aux corps biologiques seront des sous-produits de la fabrication de robots de plus en plus performants et multi-tâches. Il est généralement plus facile d'adapter au vivant une technique artificielle existante que concevoir celle-ci à partir de la page blanche. Les budgets destinés à réparer les handicaps sont par ailleurs trop faibles pour supporter des investissements spécifiques. Néanmoins les produits robotiques à destination « thérapeutique » seront sans doute de moins en moins coûteux à l'avenir, avec la diminution du coût des composants de base et l'automatisation de leur fabrication.

Les prothèses et augmentations des corps biologiques intéresseront aussi bien les animaux que les humains. On évoquera le risque que de telles techniques, commandant plus ou moins directement la production des actions et des idées, soient imposées, non seulement à certains animaux, mais aussi à certains humains, afin d'en faire des « esclaves ». On retrouvera ce risque tout au long des programmes de corps augmenté évoqués ici. Il devra être résolu par la société, comme bien d'autres risques technologiques. Sinon, les sociétés de demain s'enfermeront dans des processus d'auto-destruction.

Les réparations ou augmentations de capacité corporelle toucheront d'abord les membres. D'une part, l'on réparera les amputations, grâce à des membres robotisés commandés, soit par les nerfs s'il en reste de disponibles, soit directement par le cerveau. D'autre part, des membres renforcés, voire de véritables exosquelettes (squelettes extérieurs) permettront aux individus normaux d'améliorer leurs performances dans les tâches l'exigeant : production, exploration, champ de bataille. On ne peut pas penser, en l'état prévisible de ces technologies, qu'elles seront préférées par les individus à l'utilisation de leurs membres d'origine, car elles comporteront beaucoup de contraintes. Mais lorsque nécessité fait loi, on ne discute pas.

Des organes internes entiers pourront par ailleurs être remplacés par des appareils robotisés implantés, de plus en plus miniaturisés et fiables. On connaît déjà les stimulateurs cardiaques. Des cœurs artificiels de nouvelle génération insérables dans le thorax se généraliseront, sur le modèle du cœur prototypes proposé en France par la société Carmat.. On peut penser qu'il en sera de même prochainement pour les poumons et sans doute aussi pour les reins. Les organes jouant le rôle d'usine de transformation biochimique ou sécrétant des hormones, tels le foie, les intestins ou diverses glandes internes, ne pourront pas être complètement remplacés, sauf temporairement. Il n'est pas encore envisagé de leur substituer des automates sécrétant, par exemple, des nanoparticules de substitution, vue la complexité de la régulation des sécrétions internes..

La réparation ou l'augmentation des capacités corporelles concernera par ailleurs, et sans doute de façon particulièrement spectaculaire, les différents organes des sens. Des champs de perception tout à fait nouveaux s'ouvriront là. Les techniques de recueil et de traitement des informations de type électromagnétiques, sonores, moléculaires (odorat), tactiles dans lesquelles nous baignons et que nous ne percevons pas naturellement pourront être considérablement enrichies. Les difficultés à résoudre ne se limitent pas au recueil et à la production de ces informations, que beaucoup d'appareils font déjà plus ou moins bien. Si l'on veut qu'ils augmentent réellement les capacités sensorielles, les capteurs doivent être mis en relation directe avec les centres compétents du cerveau. Beaucoup d'humains accepteront probablement des intrants cérébraux si le bénéfice le justifie. Mais les techniques de communication par casques ou autres systèmes moins invasifs se multiplieront sans doute par ailleurs, avec une résolution de plus en plus fine, afin de ne toucher que les faisceaux de neurones le justifiant.

Jusqu'où iront les ajouts robotiques connectés directement avec les centres nerveux. En sortie, les commandes générées par le système nerveux ne devraient pas poser de problèmes. Beaucoup de tels systèmes existent déjà. Par contre, les stimulations en entrée resteront longtemps limitées à des points bien délimités. Le fonctionnement du cerveau est encore trop mal connu pour que l'on se risque, sauf urgence, à y intervenir de façon systématique. Les auteurs évoquent l'hypothèse de puces électroniques implantées à demeure, mais, outre les risques, on n'en voit pas l'intérêt réel, sauf à titre thérapeutique. La communication entre les humains et les robots se fera beaucoup plus facilement par des procédures existantes. Les robots parleront les langages humains et les humains apprendront aussi à parler les langages des robots, quand ceux-ci ne seront pas immédiatement traduisibles dans les canaux de la communication sociale courante.

Nous pensons a fortiori que les perspectives souvent évoqués par certains futurologues, consistant à télécharger sur des mémoires électroniques le contenu de certains centres nerveux, voire du cerveau tout entier, afin de créer des cerveaux artificiels reprenant les spécificité des cerveaux humains correspondants, relèvent purement et simplement de la science fiction. Il faudrait d'ailleurs reprendre et

télécharger les milliers d'information produites à tout instant par les corps vivants entiers, avec notamment leurs nombreux « générateurs d'émotions ». Si des cerveaux artificiels aussi riches que ceux des humains peuvent être construits, ils resteront cependant distincts. Les deux types d'entités, biologique et artificiel, pourront communiquer très largement et s'enrichir respectivement.

On peut également concevoir que des cerveaux et des corps artificiels coupent tous liens avec les cerveaux humains et développent des vies intelligentes propres. Mais il semble bien que les processus et contenus de l'intelligence et de la conscience biologiques, telles qu'ils s'expriment spécifiquement dans chaque individu humain, ne puissent avant très longtemps faire l'objet, comme l'espère Ray Kurzweil, d'ingénierie inverse et de transfert sur des mémoires électroniques, aussi complexes et riches que puissent devenir ces mémoires. Il n'est donc pas urgent de disserter comme certains le font, sur ce que deviendrait l'unité du Moi s'il coexistait dans une enveloppe corporelle et dans un système artificiel.

Les robots dits de compagnie

Nous avons déjà donné suffisamment d'indications sur ce que sont déjà les robots dits autonomes pour qu'il soit facile d'imaginer ce qu'ils deviendront dans les prochaines décennies. Leurs places et leurs rôles seront multiples. On peut admettre que tout ce que font actuellement les humains, y compris les tâches de conception ou de commandement, pourront être accomplis par des robots. Le seul facteur limitant leur pénétration sera le coût que pourra représenter l'adaptation à de nouvelles tâches de plateformes existantes. Il est évident que, lorsque le travail humain semblera présenter un rapport performance-prix avantageux, l'homme sera préféré. Mais il faut se souvenir de ce qui avait été dit à propos des ordinateurs. On pensait initialement qu'ils devaient rester limités aux calculs scientifiques ou techniques de haute intensité. Aujourd'hui, ils sont partout et sont devenus indispensables à tous.

Rappelons aussi que les robots de demain, comme d'ailleurs ceux d'aujourd'hui, n'adopteront de formes anthropomorphes que si celles-ci améliorent leurs capacités d'interaction avec des humains. Pour toutes les activités ne demandant que de l'efficacité fonctionnelle, les formes et modes d'intervention les plus efficaces seront seules retenues, même si elles paraissent contribuer encore davantage à la « deshumanisation » des environnements futurs.

Evoquons ici la question encore théorique, mais suscitant la verve de certains juristes, concernant les droits et devoirs des robots face aux humains et des humains face aux robots. Plus le robot sera autonome et humanisé, plus on sera tenté de le traiter comme un humain. Pourquoi pas ? Nous pensons cependant que ces questions ne seront abordées avec pertinence qu'en présence de difficultés concrètes. Elles trouveront alors des solutions adéquates. La question, bien plus urgente, des droits des animaux et des écosystèmes mériterait beaucoup plus d'attention. Ce n'est

malheureusement pas le cas.

Les robots militaires et de sécurité

C'est là que s'investissent les capitaux les plus importants actuellement. Il n'y aura malheureusement pas de raison pour que cette priorité soit modifiée. Partout prédominera le souci d'épargner le combattant de première ligne, d'autant plus que son efficacité personnelle sera de plus mise en échec par les formes de guerres de demain, exigeant à la fois technicité, réactivité et insensibilité psychique. On dit quelquefois que les futurs conflits seront ceux de la guerre des pauvres aux riches, dits aussi de la 4^e génération. Dans les deux cas, les belligérants feront appel à des robots plus ou moins sophistiqués, dont le coût ne sera guère supérieur à celui de l'homme. Citons en particulier les drones déjà mentionnés et projectiles auto-guidés sur leurs cibles, agissant soit isolément soit, dans les grandes armées, au sein de réseaux complets de stations terrestres et satellitaires, tel l'actuel Future Combat System des Etats-Unis. Les robots de sécurité civile seront davantage axés sur la protection intelligente des installations techniques et des villes. A un moindre niveau, ils se généraliseront pour la garde des résidences particulières ou des jeunes enfants.

Les robots d'exploration en milieux inhospitaliers ou hostiles

On qualifie de robots, aujourd'hui, des véhicules tels que les sous-marins de poche d'assistance aux travaux de génie maritime, les véhicules à roues dits Rovers utilisés sur Mars ou les divers sondes et satellites automatiques servant à l'observation ou à l'étude scientifique de la Terre, des planètes et plus généralement de l'univers. Mais tous ces engins, même lorsqu'ils sont inhabités, ne disposent que de très faibles capacités d'initiative. Ils sont largement programmés à l'avance ou sous contrôle humain. C'est pourtant dans l'espace et sur le mode de l'exploration confiée à des robots de plus en plus intelligents, de plus en plus capables d'initiatives, que reposera l'avenir à long terme de la robotique. Elle seule pourra concrétiser, dans la plupart des cas, la vieille et légitime ambition visant à étendre la science humaine à l'échelle cosmologique. D'importants progrès seront à accomplir, afin que les systèmes futurs puissent s'alimenter en énergie, se maintenir, se réparer ou se multiplier sur un mode quasi biologique. Mais les ingénieurs ne manquent pas de solutions. Aussi futuristes qu'elles puissent paraître aujourd'hui, elles deviendront banales demain. Ceci pour une raison simple. Après la guerre et la défense civile, c'est l'espace qui constitue déjà une priorité stratégique pour les grandes puissances. Elles sont engagées dans des rivalités de conquête analogues à celles ayant opposé les Etats-Unis et l'URSS au temps de la guerre froide. Ni l'argent, ni les moyens scientifiques et techniques ne manqueront donc aux inventeurs. Ils ne manqueront pas davantage aux robots du futur quand ils seront suffisamment évolués eux-mêmes pour exiger des crédits de développement, sur le mode de ce que font déjà les industries de l'armement au sein des actuels lobbies militaro-industriels.

Mais alors ces robots, auxiliaires voire moniteurs des humains dans les opérations d'exploration spatiale, susciteront des interrogations métaphysiques. Comment leur refuser, non seulement l'intelligence mais la conscience, sur le mode de ce que les humains qualifient de ce terme. Comment ne pas s'attacher à eux ?

Supposons un groupe de robots développés par une agence spatiale qui se comporteraient en tous points sur Mars comme le ferait une équipe de cosmonautes humains. Ces robots éviteraient les risques, identifieraient les zones intéressantes, échangeraient entre eux et avec la Terre les résultats de leurs expériences, réfléchiraient à de nouvelles stratégies d'exploration, bref porteraient le meilleur de l'intelligence humaine sur une planète qui pour quelques années encore reste inaccessible aux humains. Il ne s'agit pas là d'une hypothèse gratuite, car c'est précisément ce à quoi travaillent les diverses équipes scientifiques qui visent à étendre l'exploration spatiale au-delà de limites qu'elle n'a guère dépassées depuis le débarquement américain sur la Lune. Ces robots sont conçus comme devant précéder l'arrivée de cosmonautes puis ensuite l'accompagner. Ultérieurement, des objectifs plus ambitieux leur seront confiés. On les enverra en mission sur des astres qui seront pour de nombreuses décennies voire de nombreux siècles hors de portée humaine. Ces astres sont déjà en partie explorés par diverses sondes plus ou moins automatiques. Mais les possibilités de ces dernières sont moindres que celles offertes par des robots dotés d'une intelligence quasi humaine sinon véritablement surhumaine qui pourraient débarquer et survivre sur place.

Or, à supposer que ces robots se comportent exactement comme des humains, en faisant montre de capacités que chez l'homme nous attribuons à la conscience, y compris une conscience morale et un apparemment libre-arbitre, allons-nous déclarer qu'ils sont dotés d'une conscience humaine ? Nous avons vu en examinant les possibilités de l'IA que celle-ci peut simuler des comportements de ce type, s'appuyant sur des « valeurs » qui sont celles des sociétés humaines traditionnelles ou qui seront celles des nouvelles sociétés associant l'homme et les technologies en cours de développement. Allons nous déléguer à des robots la capacité d'interpréter de telles valeurs ? La réponse commune risquera d'être longtemps négative. On dira : « Ces robots se comportent comme s'ils étaient conscients et moraux. Mais en réalité, ce sont nous, les humains, qui sommes conscients et moraux. Ils ne le sont pas. Ce ne sont que des machines ». Pourquoi cet ostracisme qui pourrait être qualifié d'anthropocentrisme exacerbé ? Longtemps les mâles humains ont expliqué de la même façon que les serviteurs et les femmes n'étaient que des machines à peine améliorées.

Sans aborder la discussion au fond, nous pouvons signaler une réaction significative du rejet que suscitent les robots destinés à remplacer des pilotes ou opérateurs humains. Ainsi, d'ores et déjà, l'armée américaine qui fait un usage massif de drones télécommandés voudrait généraliser leur remplacement par des systèmes robotiques à pilotage autonome. Mais les pilotes d'avions militaires ou civils manifestent la plus

grande réticence face à cette orientation, en arguant de risques pouvant en résulter. Tout laisse penser cependant que des systèmes robotiques éliminant le redoutable facteur humain et suffisamment redondants pour prévenir les risques techniques, seront plus fiables que les systèmes à pilotage manuel. La communauté spatiale sait de même que les spationautes sont très réticents à l'idée de se faire précéder ou assister par des robots autonomes. Ils ne protègent pas véritablement ainsi leurs emplois futurs. Ils éprouvent certainement une sorte de peur métaphysique dont les racines plongent loin dans l'inconscient.

Les robots ludiques et artistes

Le jeu et l'art, conçus soit comme outils de formation des jeunes humains, soit comme activités développant l'imaginaire, la sensibilité et autres qualités rarement sollicitées dans la vie professionnelle, feront aussi appel à la robotique autonome. Inutile de s'attarder sur les compétitions sportives entre robots, ou les exhibitions de robots danseurs ou peintres dont le principal intérêt est encore pour le moment de stimuler les recherches en robotique autonome. C'est par contre dans le domaine de la réalité virtuelle que l'émergence de robots numériques capables de se comporter en interlocuteurs autonomes des humains impliqués dans de tels univers présentera de l'intérêt.

6.3. L'avenir de la robotique. Coopération avec les sciences émergentes.

Nous avons précédemment dressé une liste des sciences et technologies dites émergentes et convergentes, au regard de leurs relations avec l'IA et la robotique. Il s'agira de relations aussi étroitement et réciproquement imbriquées que celles déjà entretenues entre ces sciences et l'informatique. Les questions philosophiques et politiques posées par ces sciences et technologies déborderont largement leurs rapports avec l'informatique, l'IA et la robotique. Il est bon cependant d'en dire quelques mots ici. Nous nous limiterons ici à présenter quelques unes des relations symbiotiques s'établissant entre ces sciences et la robotique, sans les examiner en tant que telles. Le faire nécessiterait en effet des dizaines de volumes.

Les réseaux intelligents (le cerveau dit global)

La littérature mondiale sur ce sujet est immense. Dès les origines du web, on a voulu y voir l'équivalent d'un cerveau biologique, disposant de neurones individuels dotés d'une autonomie locale (pro-activité), reliés par des canaux interneuronaux plus ou moins denses en fonction de la fréquence des trafics, et s'organisant autour de centres serveurs eux-mêmes distribués, sans contrôle hiérarchique central. La génération de contenus informationnels circulant sur le réseau dans une compétition relative a par

ailleurs été comparée à celles des idées créées par des cerveaux individuels et échangées par les outils de la communication sociale. On s'est demandé enfin si les virus informatiques, dont l'apparition et la prolifération éventuelles sur le web ressemblent beaucoup aux modes d'action des virus biologiques, ne seraient pas l'indice d'un début d'autonomisation de la part de certains éléments du web lui-même considéré comme un cerveau global.

Il est certain que la réflexion sur les réseaux artificiels, que ce soit ceux du web, des simples communications téléphoniques et postales ou des échanges de trafic entre centres urbains, présente beaucoup d'intérêts pour les neurologues. Ils peuvent ainsi mieux comprendre les échanges entre composants cellulaires du cerveau. Mais la question qui nous intéresse ici est un peu différente. Nous nous demandons si un réseau comme le web et plus généralement tous les réseaux électromagnétiques reliant les humains peuvent donner naissance à des robots numériques qui prendraient de l'autonomie par rapport aux utilisateurs humains de ces réseaux, quitte à se retourner contre eux éventuellement. Il y a tout lieu de le penser, sous la pression d'ailleurs des humains qui feront naître puis encourageront ces comportements afin d'augmenter leur propre pouvoir.

A l'extrême on pourrait se demander si de tels robots, en acquérant des corps, des organes d'entrée- sortie et des cerveaux virtuels, ne se transformeraient pas en véritables entités artificielles quasi-vivantes. Ces entités pourraient alors se développer et se complexifier dans le cadre d'une compétition darwinienne ressemblant à celles des organismes biologiques entre eux. En théorie, rien n'interdit de penser que cette situation puisse se produire, dans un avenir relativement proche.. On constate, en étudiant l'IA, que de nombreux programmes auto-générateurs et auto-complexificateurs existent déjà. Ils servent à faciliter l'adaptation de certaines machines complexes à des changements dans leur environnement. Leur population pourrait s'étendre, si le monde du virtuel en pleine expansion leur offrait un terrain favorable.

L'opacité des réseaux contemporains, dont la complexité n'est analysable qu'en termes statistiques globaux, incite certains observateurs à penser que des centres de décision autonomes, échappant aux humains, sont déjà en cours d'émerger sur le web. La puissance des moteurs de recherche, le caractère touffu des réseaux de serveurs, pourraient favoriser la naissance discrète de telles entités.

A cet égard, les scandales actuels suscités par la découverte de la façon dont les services d'espionnage américains (National Security Agency et CIA) ont prélevé des millions d'informations sur les usagers du web et constitué avec elle d'immenses Data Centers a généré une méfiance générale chez les citoyens. L'internet jusque là considéré comme un espace de liberté incomparable se révélait, selon une expression justifiée, une sorte de « goulag électronique. Bien pire, il est apparu que les entreprises appelées les « géants du web », Google, Facebook, You Tube, mais aussi Microsoft et Amazon, faisaient le même travail pour des objectifs commerciaux –

non sans relations d'ailleurs avec les services de renseignement américains. Or pour interpréter les milliards d'informations collectées, dites Big Data, ces entreprises et services ont conçu des logiciels travaillant à grande vitesse et sans aucun contrôle humain. Il s'agit d'un nouveau type de robots qui, comme les algorithmes financiers déjà mentionnés, ont de plus en plus tendance à s'autonomiser. Il faut lire à cet égard l'ouvrage d'Alain Cardon, spécialiste de la conscience artificielle et disponible sur le site Automates Intelligents "[Vers un système de contrôle total](#)" Edition Automates Intelligents, 20 octobre 2011

Les univers virtuels ou de synthèse

Nul n'ignore l'importance que prend désormais ce que l'on nomme en simplifiant la réalité virtuelle dans la création artistique, la recherche scientifique, les pratiques professionnelles et plus généralement la vie quotidienne. On peut définir la réalité virtuelle comme une technique consistant, grâce à des algorithmes mathématiques et informatiques, à reproduire sur un écran des univers et des entités en 3 dimensions semblables ou au contraire très différents de ce que nous rencontrons dans le monde réel. On pourrait penser que les personnages mis en scène n'ont guère de rapports avec les robots. Rien ne les distingue formellement, sauf des techniques sophistiquées d'animation, de ceux conçus pour le cinéma et la télévision. Pour le moment, les personnages n'ont aucune possibilité d'autonomie, une fois sortie des « cartons » des dessinateurs. Ils n'interagissent pas avec les spectateurs. Ils les influencent, mais ne sont pas influencés ni modifiés en retour. Mais ceci pourra survenir très vite.

Il suffit de considérer les jeux vidéo où les joueurs humains doivent se doter d'images ou avatars d'eux mêmes qu'ils composent au mieux de leurs désirs ou de leurs fantasmes. Ces personnages se rapprochent de certaines formes de robotique. Ils sont appelés à évoluer compte tenu des conflits et compétitions avec les autres personnages. Le titulaire de l'avatar se voit ainsi souvent obligé de tenir compte, sans le vouloir, de contraintes extérieures l'obligeant à accepter une nouvelle image de lui, en face de laquelle il est appelé à se redéfinir. Ce jeu permanent de créations et recreations pourrait donner l'occasion d'innombrables analyses susceptibles d'intéresser les sciences humaines.

On voit donc que l'introduction de personnages virtuels dans les oeuvres imaginaires pose les mêmes question que l'introduction dans les sociétés humaines traditionnelles d'agents artificiels ou robots dotés d'aptitudes à l'autonomie, face auxquels les individus et les groupes devront mieux définir leurs spécificités, s'ils en ont. Ce sera encore plus évident lorsque se généraliseront les créatures virtuelles dites haptiques ou « à retour d'effort », avec lesquelles le contact, bien que virtuel, donnera l'impression d'être réel.

Les techniques utilisées: perception en 3 dimensions, immersion sensori-motrice avec retour d'effort, interaction en temps réel, sont des développements de ce qui a été fait

à plus petite échelle dans le multimédia éducatif et ludique ou dans les simulateurs industriels, destinés notamment à la formation des pilotes. La conjonction de ces techniques conduit tout naturellement à la réalité dite "augmentée" On aboutit à la "télé-présence" ou "sortie du corps", qui n'ont pas là de dimension mystique, mais signifient simplement que l'expérimentateur est complètement détaché par le système des pesanteurs de ses représentations habituelle.

La réalité virtuelle ou réalité augmentée pose à grande échelle la question de la prolongation des capacités sensorielles des organismes biologiques par divers moyens artificiels. On sait que le cerveau, s'il ne dispose pas de repères extra-sensoriels, peut se montrer incapable de distinguer entre un monde réel et un monde virtuel. Il n'y a là rien d'étonnant, si les messages en provenant sont identiques ou quasi identiques. Certains cosmologistes ont émis l'hypothèse que nous ne serions nous-mêmes, dans notre monde supposé réel, que des acteurs virtuels verrouillés dans un univers créé par des intelligences émanant d'un super-univers extérieur à nous.

Les films en réalité virtuelle, comprenant ou non des acteurs réels plus ou moins transformés, donnent une bonne idée de la philosophie qui sous-tend la philosophie des mondes virtuels dans la production cinématographique et les jeux vidéo : notamment la difficulté à distinguer le virtuel du réel, la dimension mythique voire mystique de l'histoire, la récursivité de la virtualité c'est-à-dire le fait qu'un monde virtuel donne accès à un autre, au lieu de renvoyer à un moment donné au réel. Ils permettent d'étudier aussi les répercussions de la fréquentation des mondes virtuels sur les personnalités des personnages. Cette fréquentation se traduit par la difficulté à sortir du monde dans lequel les sujets sont immergés, la compulsion à faire certaines actions, pouvant aller jusqu'à un enfermement addictif. D'une façon générale, on retrouve l'idée qu'il est difficile, sinon impossible de faire la preuve de ce qu'un phénomène est réel face à son double virtuel.

Ces films ou jeux vidéo, malgré leur apparente diversité foisonnante, posent une autre question, celle de l'aptitude qu'ont ou non les auteurs ou les acteurs, quand ils ont la parole lors de certains jeux, à imaginer des mondes virtuels véritablement innovants. Nous avons un peu l'impression qu'ils se répètent tous en exploitant un effet de mode. Au début, le caractère original de ces films leur a permis de créer leur public, en faisant sensation. Mais se renouvellent-ils aujourd'hui ? On retrouve dans ces films le même défaut qui a frappé les films et série de science-fiction présentant des robots, chaque nouvelle œuvre semblant un remake de Star Trek. De plus, l'originalité n'est-elle pas finalement plus dans la forme que dans le fond.

Les thèmes sont transposés du vieux fond, mélange de mystique, de préjugés et de manque d'ouverture aux autres sociétés, qui se retrouve depuis une cinquantaine d'années dans toutes les formes d'expression de la société américaine, roman et cinéma notamment. La question nous paraît plus importante qu'il ne paraît. Pourrait-on inventer, ou plutôt voir apparaître un virtuel qui remette radicalement en cause les croyances et certitudes intellectuelles établies ? Sans doute pas, si dans ce domaine

comme dans tous les autres domaines de la création, on veut rester fidèle à des convenances qui sont, pense-t-on, le prix à payer pour réaliser un chiffre d'affaires suffisant.

Cette contrainte peut expliquer, en partie, la difficulté à faire, au moins dans ces films, la différence entre le réel et le virtuel. C'est qu'il s'agit un peu du même monde. Si l'on était capable de laisser des agents autonomes (comme le seraient par exemple des extraterrestres, ou des animaux), nous proposer des versions virtuelles de leur monde à eux, peut-être pourrions nous identifier des logiques radicalement différentes à l'œuvre. Techniquement, c'est aujourd'hui impossible. Cependant, si on considère que la sphère du virtuel s'étend ou à vocation à s'étendre bien au-delà de la cognition humaine actuelle, il faut garder cette perspective en tête.

Sur un plan épistémologique, on retrouve là un problème posé avec beaucoup plus d'ampleur par la mécanique quantique. Il s'agit la question de la consistance de ce que nous appelons le réel. Pour la philosophie scientifique moderne, il n'existe pas des entités réelles en soi ou ontologiques, indépendantes de l'homme, que celui-ci pourrait observer en se situant en dehors d'elles. Tout pour lui se traduit par des représentations internes à son cerveau, qui font l'objet de traitements différents selon l'expérience de chacun. Il est donc important de se rendre compte que les garde-fous mis par le bon sens traditionnel, permettant de ne pas confondre le réel et l'imaginaire, les choses et leurs apparences, sont en train de disparaître. Il faudra vivre dans un monde tout différent, dont les contours apparaissent à peine.

Une deuxième question vient dans la suite de celle-ci. Est-il possible de distinguer le virtuel du potentiel. On répond généralement par la négative. Le virtuel vise très souvent à présenter des univers futurs, probables ou improbables, comme s'ils étaient réels. Il fait tout pour empêcher de les distinguer du réel. Il construit de véritables « hallucinations » qui risquent d'enfermer en elles-mêmes ceux incapables d'en sortir. Mais est-ce là un mal ou un bien? Inventer des univers virtuels réellement originaux, voire inventer des robots qui se comporteront comme des êtres jamais rencontrés jusqu'à ce jour, ne constitue-t-il pas un élément favorable au renouvellement de notre monde quotidien ? Les scénarios explorant des mondes virtuels ou des robots qui soit n'existent pas encore, soit même paraissent aujourd'hui impossibles ne vont-ils pas créer les conditions favorables à leur réalisation, dans le sens où l'on dit que ce que l'homme imagine finit toujours pas se réaliser ?

Beaucoup de prévisionnistes, nous l'avons vu, envisagent le développement exponentiel des moyens de calcul, qui se traduira par le développement lui-même exponentiel des applications faisant appel au virtuel. Ceci s'accompagnera de la possibilité croissante d'interagir directement avec les cerveaux, dans les deux sens, soit pour créer des illusions sensorielles et cognitives, soit pour donner une consistance matérielle aux créations de l'imaginaire. Il paraît indéniable que, sauf catastrophe dans le développement technologique, ces perspectives se réaliseront un jour, peut-être même dans la première moitié de ce siècle. Dans quels mondes

vivrons-nous alors ? Les gens préféreront-ils voyager dans des pays virtuels, reproduction ou non de pays réels, plutôt qu'affronter les frais et les risques du tourisme sur une planète surpeuplée et agressive. Préférera-t-on fréquenter des partenaires artificiels, humains ou animaux, si ceux-ci offrent autant de ressources que des êtres vivants, sans imposer leurs contraintes ? On serait tenté de répondre par l'affirmative, quand on voit la préférence déjà affichée par beaucoup de nos contemporains pour l'illusion.

On peut répondre à cette question en rappelant que l'homme a toujours construit sa niche dans l'univers en combinant inextricablement les ressources offertes par son organisation biologique, les constructions cognitives de son cerveau, les ressources de ses moyens de computation et finalement la mise en place de mondes virtuels s'enracinant dans un réel dont on ne peut rien dire, sauf qu'il paraît riche d'infinies possibilités (réel symbolisé aujourd'hui par le concept de vide quantique). Plus généralement, le monde dans lequel nous vivons serait fait d'une intrication permanente entre le quantique, le cognitif, le biologique et le virtuel, dont la pensée humaine contemporaine devra inévitablement tenir compte. Ceci d'autant plus qu'en tous ces domaines se manifeste un aspect fondamental de la rétroaction homme-machine : le prétendu clonage, loin d'être à l'identique, modifie inexorablement l'original.

Les nanomatériaux et nano-objets

Les nanosciences et nanotechnologies (NST) peuvent être définies comme l'ensemble des études et des procédés de fabrication et de manipulation de structures, de dispositifs et de systèmes matériels à l'échelle du nanomètre (milliardième de mètre). Dans ce contexte, les nanosciences sont l'étude des phénomènes et de la manipulation de la matière aux échelles atomique, moléculaire et macromoléculaire, où les propriétés physico-chimiques diffèrent sensiblement de celles qui prévalent à une plus grande échelle. Les nanotechnologies, quant à elles, concernent la conception, la caractérisation, la production et l'application de structures, dispositifs et systèmes par le contrôle de la forme et de la taille à une échelle nanométrique.

On considère très généralement aujourd'hui que les nanosciences ouvrent des perspectives considérables aux sciences de l'ingénieur et à la robotique. Elles permettront soit de réaliser de nanomachines ou nanorobots capables d'opérer par exemple à l'intérieur du corps, soit d'obtenir des matériaux de grande résistance (par exemple des nanotubes de carbone) offrant une grande résistance pour la réalisation des éléments physiques des robots. Nous pensons que ces perspectives sont intéressantes mais que pour le moment elles relèvent encore de la recherche fondamentale. Il est difficile de concevoir des nanorobots, faits d'une ou plusieurs nanoparticules, si l'on ne sait pas comment les doter de propriétés les rendant aptes aux opérations logiques.

La presse confond souvent à cet égard les nanomachines avec des machines travaillant à l'échelle microélectronique, les MEMS. Un MEMS ou microsystème électromécanique comprend un ou plusieurs éléments mécaniques, utilisant l'électricité comme source d'énergie, en vue de réaliser une fonction de capteur et/ou d'actionneur avec au moins une structure présentant des dimensions micrométriques. Issus de la technologie de la microélectronique, les MEMS font appel pour leur fabrication à ces dernières, lesquelles permettent une production à grande échelle.. Leurs applications sont désormais nombreuses, notamment en robotique.

Un des avènements des nanotechnologies en robotique repose sur la capacité d'utiliser les nanocomposants non de façon isolée mais en essaims de millions d'unités de base. Ces essaims pourraient alors se comporter comme des robots macroscopiques, disposant de corps et d'unités logiques leur permettant d'agir de façon coordonnée. Des applications militaires ou spatiales (*smart dust* ou poussières intelligentes) sont déjà à l'étude. De tels essaims pourraient en effet survivre sans les contraintes des organismes biologiques et préfigurer des formes de vie et d'intelligence en milieu hostile ou extraterrestre.

Les chercheurs s'intéressent par ailleurs aux possibilités de l'ingénierie moléculaire. Certaines nanomolécules pourraient se reproduire spontanément, sur un mode quasi biologique. La science fiction a exploité des scénarios selon lesquels des nuages de nanomatière dotés de propriétés organiques pourraient envahir notre environnement (grey goo). Dans une perspective plus concrète, il s'agirait d'une formule permettant d'obtenir des robots auto-réplicants susceptibles de coloniser le système solaire. Le risque d'un emballement mettant en péril la vie sur Terre existera à terme, comme dans tous les domaines de la science, mais il ne nous paraît pas justifier les peurs quasi religieuses que suscitent actuellement les nanotechnologies dans certains milieux.

6.4. Robotique et risques

Une question souvent posée à propos des robots, consiste à se demander si le développement rapide, sinon exponentiel, de la robotique dans les sociétés modernes présente un danger pour l'homme. Cette question était dans l'esprit d'Isaac Asimov, ce romancier de Science Fiction qui avait exploité le thème du robot dans ses oeuvres, à une époque où la robotique n'avait évidemment pas atteint le degré de développement actuel. La réponse qu'il proposait était simple: établir une grande loi que les roboticiens et les robots eux-mêmes devraient respecter: ne pas faire de mal aux humains. Aujourd'hui, la même réponse est suggérée par ceux qui se préoccupent de l'éthique de la science et de la technologie, c'est-à-dire des règles morales élémentaires que, sans référence particulière aux religions, mais en termes de morale sociale laïque, les scientifiques devraient s'efforcer de respecter.

En application de cette règle, ne pas faire de mal aux humains, les ingénieurs qui conçoivent les robots devraient éviter de réaliser des robots potentiellement prédateurs, susceptibles de faire des victimes et provoquer des dégâts. Mais toute technologie est dans ce cas. Il n'y a pas plus prédateur que l'automobile aujourd'hui. Il est donc demandé aux concepteurs de robots de prévoir des dispositifs, câblés dans le corps du robot ou intervenant sur ordre de programmes spécifiques, capables de désactiver le robot en cas de comportements dangereux. Nous évoquons ici par ce terme des comportements dangereux non voulus par les humains travaillant avec le robot. Il est bien évident que si un robot militaire tue par erreur des civils dans le cadre de missions assignées par le commandement, ce ne sera pas le robot qui devra être blâmé. Ce sera le commandement qui avait commandé la mission tout en connaissant pertinemment le risque de destructions collatérales. Le risque dont il faut se prémunir, en ce cas, est celui d'un robot dont les fonctions de contrôle interne se désactiveraient ou s'affoleraient, ce qui pourrait le conduire à sortir des limites prévues par le constructeur et l'utilisateur, pour s'adonner à des conduites dangereuses, aléatoires ou ciblées.

En quoi dans ce cas le robot pose-t-il un problème particulier? Toutes les machines complexes peuvent à un moment ou un autre se désorganiser, entraînant des catastrophes. On l'a vu à l'occasion de la perte en 2009 du vol Air France Rio-Paris, dont les causes restent inconnues mais qui sont probablement imputables à des défaillances du système de contrôle. Pour s'en prémunir, les ingénieurs multiplient ce que l'on nomme les redondances, c'est-à-dire les commandes de secours. Pourquoi ne pas faire de même, à propos des robots? On peut très bien l'équiper d'instructions qui le déconnecteraient au cas où son comportement le ferait entrer dans des zones rouges, c'est-à-dire des zones où il deviendrait potentiellement dangereux, pour lui-même et pour les autres.

C'est bien évidemment ce que font les ingénieurs. Les cahiers des charges visant la réalisation des robots modernes, qu'ils soient militaires ou civils, comportent de telles clauses. Mais, disent les esprits inquiets, que se passera-t-il si le robot, devenu suffisamment intelligent, trouve moyen de désactiver lui-même les commandes lui fixant des barrières à ne pas franchir. Azimov n'avait pas cru devoir évoquer sérieusement cette possibilité, car de son temps, l'hypothèse d'un robot pleinement intelligent et conscient capable de se dresser contre les humains en échappant aux règles morales qui lui auraient été imposées relevait d'un niveau supérieur de science-fiction qu'il n'avait pas abordée. Aujourd'hui, la perspective mérite d'être envisagée. La robotique n'est pas encore capable de produire des robots pleinement autonomes, leur autonomie s'exerçant, comme nous l'avons indiqué plus haut, dans le cadre de contraintes fixées à l'avance et supposées être indépassables. Mais les robots et leur environnement deviendront rapidement si complexes qu'il sera difficile de prévoir ce qui leur passera, si l'on peut dire, par la tête.

Un robot peut devenir dangereux sans être devenu véritablement méchant, ou « malicieux » au sens américain, termes incluant la référence à des valeurs morales

quasi religieuses transcendant la technologie. Comme il est constitué de nombreux composants qui évoluent sans cesse et de façon plus ou moins aléatoire, notamment au niveau des interactions entre les agents logiciels qui commandent son comportement, il peut parfaitement muter, au sens propre du terme, c'est-à-dire prendre la forme d'une version imprévue par les concepteurs et les utilisateurs humains. Certaines de ces nouvelles versions pourraient se révéler utiles à ses missions initiales et donc bienvenues. Ainsi il pourrait améliorer spontanément tel ou tel de ses programmes afin de fonctionner sur un mode plus économe en énergie. Mais à l'inverse, une mutation pourrait le rendre, non seulement dangereux, mais capable de désactiver durablement les contraintes internes fixées à son comportement et destinées à limiter sa dangerosité.

Que se passerait-il alors? Il faut bien se persuader que les robots ne sont (ou ne seront) pas très différents de tous les autres organismes évolutionnaires apparus sur Terre depuis les premiers pas de la vie. Ces organismes mutent sans cesse, sans préoccupations morales a priori. Les nouvelles versions d'organismes résultant de ces mutations se heurtent à un univers déjà constitué, qui leur impose ce que l'on nomme en évolution des barrières sélectives. Ou bien les mutants se révèlent plus efficaces que leurs prédécesseurs et peuvent échapper aux barrières sélectives. En ce cas ils survivent et donnent naissance à de nouvelles lignées. Ou bien au contraire ils ne le peuvent pas et disparaissent, rejoignant l'immense cimetière des inventions fessées-elles géniales mais rejetées par le milieu.

Très bien dira-t-on. Ceci est rassurant. Comme ce sont des humains qui fixent les barrières sélectives, il suffirait qu'ils prévoient à l'avance l'élimination de tous les éventuels robots mutants susceptibles de devenir dangereux. Les humains auront donc toujours affaire à des populations de robots domestiques, aussi inoffensifs pour eux que le sont devenus les animaux ex-sauvages domestiqués depuis plusieurs millénaires.

Nous pensons pour notre part que croire cette évolution comme assurée relève de ce que nous pourrions appeler une illusion humaniste. C'est oublier le fait que les humains et leurs technologies se développent d'une façon quasi symbiotique, dans le cadre d'échanges entre caractères fondateurs qui en font de nouvelles espèces mutantes, entrant en compétition darwinienne les unes avec les autres. Ceci a été dit depuis quelques temps à propos de l'automobile ou des ordinateurs. Les usagers et à plus forte raison les concepteurs et constructeurs de ces machines ne sont pas capables, quoiqu'ils prétendent, d'orienter leur développement à partir de décisions rationnelles qu'ils s'estiment capables de prendre. Depuis des années, on a voulu limiter la dangerosité des voitures. Certains résultats ont été obtenus, mais le prélèvement en vies humaines ne cesse de croître, du simple fait de l'extension quasi virale du nombre de ceux que nous pourrions appeler des « homo-automobilis ». Si la croissance de ce nombre s'arrêtait, ce ne serait pas du fait de la volonté des humains, mais parce que des limites physiques empêcheraient désormais leur prolifération, manque d'espace, manque de carburant ou de matières premières.

Les ordinateurs et produits électroniques divers ne sont pas aussi dangereux que les automobiles, mais dans certains cas, ils peuvent le devenir. C'est le cas du téléphone au volant et de la consultation des écrans multiples que les constructeurs veulent insérer sur les tableaux de bord, soi-disant pour améliorer la sécurité et le confort de conduite, en fait pour faire du profit et, plus en profondeur, contribuer à des mutations favorables à la dissémination de l'espèce *automobile+homo-automobilis*. Les autorités réglementaires qui étaient intervenues, sans grand succès, pour limiter le téléphone au volant auront beaucoup de souci à se faire, car le poids des lobbies conjugués de l'automobile et de l'électronique favorisera la prolifération de l'internet au volant. Les accidents se poursuivront donc, dans l'indifférence générale.

Peut-on transposer cette réflexion à l'avenir des robots et des hommes qui d'une façon ou d'une autre, s'associeront à leur développement? Certainement. Plus encore que les automobiles et autres machines faiblement intelligentes, les robots disposent, par définition, de capacités d'adaptation aux humains considérables. Nous avons rapidement évoqué ce point en décrivant l'avenir de la robotique domestique ou conviviale. De même qu'un propriétaire de chien choisit celui-ci et l'élève en fonction de son caractère, à lui propriétaire, faisant de l'animal un agneau sympathique ou une bête fauve, de même procédera le propriétaire ou l'utilisateur d'un robot domestique. Mais de même que dans le couple homme-chien, ce n'est pas seulement l'homme qui déteint sur le chien mais le chien qui déteint sur l'homme, de même dans le couple homme-robot les caractères s'échangeront très vite.

Ils ne le feront pas d'une façon statique, puisque l'homme et le robot sont deux entités évolutives. Ils le feront d'une façon dynamique. Autrement dit, l'homme et le robot développeront par interaction des déterminismes évolutifs communs ou corrélés. Chez l'homme, ce sera un certain type d'organisation du cerveau ou de l'ordre cellulaire, pouvant se répercuter à certains niveaux du génome. Chez le robot, il s'agira de réorganisations principalement logicielles se transmettant par réseaux. L'humain dans ce cas pensera sans doute qu'il restera maître du sens pris par l'évolution globale du système homme-robot, mais ce sera une illusion.

Les moralistes s'indigneront. Que restera-t-il des humains que vous décrivez? Il restera, pour prendre une image de plus en plus utilisée, des post-humains. Mais ceux-ci seront-ils bons ou mauvais? Les deux. Plus exactement ils seront ce que leur confrontation avec un environnement de plus en plus imprévisible, du fait du développement exponentiel des technologies et de leurs usages, leur permettra de devenir. Nul ne peut aujourd'hui le prévoir. Les philosophies matérialistes auront un rôle essentiel dans la définition des nouveaux objectifs à poursuivre.

A suivre

Chapitre 7. Les cerveaux

Recherches intégrées sur le cerveau (Global Brain research)

Le cerveau augmenté (interfaces cerveaux machines)

Le cerveau global. Internet. Internet des cerveaux.

Le cerveau artificiel

Chapitre 8. La société numérique

Nouveaux humains

Domination américaine

Espionnage

Chapitre 9. Le spatial

Spatial militaire, spatial de service, spatial de recherche, exploration planétaire

Conclusion

Références