

Introduction

Marie-José DURAND-RICHARD*

L'existence de machines susceptibles de simuler des actions ou des processus habituellement attribués au seul être humain est un motif récurrent d'inquiétude en même temps que de fascination. Depuis la Seconde Guerre Mondiale, la cybernétique dans les années 1950, l'intelligence artificielle et les sciences cognitives depuis les années 1960, suscitent des réactions qui hésitent entre des attitudes antinomiques allant du rejet au triomphalisme. L'une et l'autre de ces deux attitudes extrêmes constituent une réponse spécifique à l'effacement de frontière que ces nouvelles conceptions semblent signifier entre l'humain et la machine. L'enthousiasme vient surtout des spécialistes, techniciens, ingénieurs, mathématiciens et logiciens, qui pour la plupart se réjouissent d'être les auteurs-acteurs d'une telle matérialisation d'aptitudes dont seul l'humain était jusqu'ici jugé capable. N'approchent-ils pas ainsi un acte de création qui, depuis des siècles, n'a pour seul horizon que le mystère de la vie ou la référence au divin ? N'est-ce pas précisément cette transgression d'un pouvoir censé dépasser la condition humaine qui suscite la crainte et l'hostilité des non-spécialistes ?

D'un point de vue conceptuel, si la cybernétique et l'intelligence artificielle bousculent la frontière entre humain et machine – ainsi qu'entre d'autres entités qui s'y réfèrent : animé et inanimé, esprit et corps, abstrait et concret, naturel et artificiel, sciences et techniques – il est permis de se demander si elles n'induisent pas un retour à des conceptions antérieures à celles de la science classique, jusqu'aux philosophes présocratiques qui considéraient, à l'origine des choses, des éléments premiers auto-générateurs, porteurs de leurs propres possibilités de transformations. Si tel était le cas, y aurait-il là une sorte de retour à un état d'indistinction, voire une régression de la pensée ? A tout le moins, ces nouvelles perspectives débouchent sur un affrontement philosophique sévère entre dualistes et monistes, dès lors qu'une production humaine s'avère susceptible de matérialiser une autonomie qui n'est pas seulement autonomie de mouvement, mais autonomie d'organisation et de décision.

Au delà des questions philosophiques, dans tous les secteurs de la vie sociale, professionnelle, voire domestique — des tâches les plus matérielles au domaine de la connaissance —, les restructurations considérables qu'autorisent ces machines autonomes (ordinateurs, robots) amplifient cette tension entre engouement et appréhension. Faudrait-il regretter le temps où la division mécaniste du travail et son organisation taylorienne accordaient à chacun une place dans l'entreprise et dans la société, quelque aliénante qu'elle ait pu être ? Là où les mêmes systèmes explicatifs semblent pouvoir rendre compte de l'autonomie de l'humain, de l'animal, et des machines informationnelles, le sujet ne risque-t-il pas de perdre l'originalité de ce qui est sensé le distinguer du

* Université Paris 8 (Vincennes Saint-Denis), Histoire et Épistémologie des Sciences et des Techniques, chercheur associé REHSEIS-UMR 7596 – CNRS, e-mail : mj.durand-richard@laposte.net.

monde matériel et des autres espèces, dès lors que s'efface la référence à l'âme ou à l'esprit comme lieu de cette autonomie ? Ne court-il pas le risque d'être réifié, identifié à une de ces nouvelles machines qui peut du coup le remplacer ? L'humain serait-il désormais condamné à errer, vis-à-vis du monde dans lequel il vit, entre fusion et exclusion ?

Quelle que soit l'appréciation portée sur l'ambition considérable, voire démesurée, dont sont porteuses ces productions nouvelles, comprendre leurs implications, tant épistémologiques que civilisationnelles, suppose et/ou permet d'échapper aux mythes qui sous-tendent ces attitudes réactives. L'intention première des textes réunis dans ce volume est précisément de tenter de dépasser cette tension, ou au moins d'en déplacer le mode de lecture, en resituant le développement des techniques et des conceptions qui ont abouti à ces nouvelles machines dans une perspective spécifiquement historique. Il s'agit de privilégier une démarche qui ne se contente pas de repérer, dans le passé, les traces d'un présent envisagé comme aboutissement inéluctable du progrès, mais qui cherchera plutôt à en analyser les conditions d'élaboration et de transmission afin d'en préciser les limites épistémologiques et sociales. Ce qui, de l'humain, se trouve applaudi ou menacé par l'existence des machines informationnelles n'est peut-être pas tant sa « nature », que la représentation que nous en partageons, et qui s'est constituée, et imposée à nous, à partir des concepts fondamentaux de la science classique, qui constitue le cadre de référence dans lequel nous sommes tentés d'apprécier le monde et ses caractéristiques telles qu'elles ont été spécifiées depuis le XVII^e siècle.

Effectivement, les recueils d'introduction à la cybernétique, à l'intelligence artificielle ou aux sciences cognitives cherchent à repérer dans le passé les prémisses d'une possible identification de la pensée, de la raison ou du langage au calcul. Ils se réfèrent le plus souvent à Thomas Hobbes (1588-1679) et à Gottfried W. Leibniz (1646-1716), Hobbes ayant écrit en 1651 que « penser, c'est calculer », et Leibniz ayant exprimé l'ambition de produire une langue universelle fondée sur un calcul logico-algébrique. Supposer ainsi que la seule énonciation d'une métaphore ou d'un projet philosophique suffise à rendre compte de sa réalisation renvoie à une conception finaliste de l'histoire des idées, trop oublieuse de la distinction historique entre le possible et le réel. Ce regard macro-historique rétrospectif conduit à ignorer l'analyse de leurs conditions de possibilité, tant épistémologiques que sociales, économiques ou politiques, et à masquer le fait que les représentations qui les sous-tendent, ici celles de l'humain et de la machine, sont inscrites dans un temps et une culture donnés. Il existe une inconsistance fondamentale à vouloir apprécier le problème de la pensée à la lumière des possibilités offertes par ces nouvelles machines, en se contentant d'examiner la question avec comme référent la séparation corps-esprit héritée du XVII^e siècle, alors que leur existence même remet en cause les fondements de cette séparation, et du dualisme qui la sous-tend. Et si ces possibilités sont actuellement susceptibles d'étayer un monisme philosophique proche du matérialisme, leurs présupposés demandent à être précisés.

La collection des textes ici rassemblés, sans prétendre à l'exhaustivité, ambitionne d'inscrire ces productions, tant philosophiques que scientifiques et techniques, dans l'historicité de leur élaboration, et d'examiner les limites et les enjeux des conceptions qui leur sont attachées. Elle restitue les différentes

facettes d'une rencontre entre différents spécialistes de sciences cognitives, d'histoire et de philosophie des sciences, qui s'est d'abord concrétisée dans un colloque organisé en 1998 par la coordinatrice de ce volume, puis par ce travail d'édition des textes qui en furent issus, malheureusement retardé par des difficultés de publication. Cette rencontre fut initialement organisée autour d'une thématique constructiviste visant à fédérer les conceptualisations porteuses d'un dépassement de la séparation corps-esprit soutenue par la science classique. Elle a permis de préciser les conditions épistémologiques et contextuelles qui ont conduit savants et philosophes, scientifiques et ingénieurs, à formaliser et à matérialiser des processus longtemps identifiés à l'exercice de la raison. Du même coup, elle a débouché sur une explicitation des fondements d'une ligne de clivage qui persiste à opposer aujourd'hui les tenants d'un constructivisme interne, de type logico-mathématique ou computationnel, et ceux d'un constructivisme externe plus radical, de type phénoménologique. Comme ces textes tendent à le montrer, ce clivage s'articule, de fait, sur les différentes interprétations accordées à la constructivité du raisonnement ainsi mis en œuvre. Du XVII^{ème} au XX^{ème} siècle, la mathématisation du mouvement est en effet devenue formalisation des processus opératoires, et cette transition s'inscrit dans une histoire de la raison (Châtelet, 1992) qui cherche à rejeter hors de son champ d'analyse tout ce qui est susceptible de relever de l'imagination. Reste à savoir, ou à décider, au titre d'hypothèse, si cette raison est ou non première dans l'exercice de la pensée. Ce sont ces présupposés – séparation entre raison et imagination, supériorité de la première sur la seconde – que les difficultés issues d'identifications trop hâtives entre pensée et calcul, ou entre cerveau et ordinateur, conduisent précisément à questionner. Et c'est la possibilité même de ce questionnement qui bouscule, avec pourtant des orientations différentes, la position offerte au sujet dans le paradigme de la science classique. Au moment où la connaissance devient cognition, elle s'affirme en même temps comme acte du sujet, et non plus seulement comme regard ou méthode permettant de contempler ou de lire le monde. Ainsi reconnu comme acteur, un tel sujet s'affirme susceptible d'agir sur le monde, et il engage là toute sa responsabilité, puisqu'il le fait librement, en toute autonomie, et donc à ses risques et périls.

Telle qu'elle se donne à entendre, par exemple dans le discours cartésien, la science classique présuppose en effet un sujet rationnel, radicalement séparé de la nature. Là où la *Physis* aristotélicienne accordait une autonomie de mouvement à tous les êtres de nature, le XVII^{ème} siècle distingue entre le mouvement de la matière inerte, soumise au déterminisme des lois de la nature, qui sera objet de science, et l'autonomie attribuée à l'esprit, qui est le propre du sujet. Il n'empêche que cette science demeure pensée dans un cadre théologique, et que le savant lui-même n'y est envisagé que comme révélateur exigeant et méthodique d'un monde pré-existant qu'il ne fait que découvrir. Et si les développements issus de la mathématisation de la logique depuis le XIX^{ème} siècle, ainsi que les énormes besoins en calcul suscités par la Seconde Guerre Mondiale, ont débouché sur la formulation logique d'une certaine forme d'autonomie, ils n'ont pas fondamentalement déplacé ces présupposés de la science classique. Bien que le théorème d'incomplétude de Gödel (1931) ait imposé un démenti radical au mythe d'une langue syntaxique parfaite englobant toutes les langues naturelles (Eco, 1994), et qui permettrait de rendre le monde transparent à la raison, celui d'une « intelligence artificielle » (1956) a d'abord persisté à confondre puissance du calculable et richesse du pensable.

Face aux limitations internes des formalismes, donc des ordinateurs, et grâce au refus philosophique d'identifier l'autonomie de la pensée à celle de ces machines, d'autres recherches, étayées aussi bien par l'étude des systèmes dynamiques en physique que par la modélisation des réseaux neuronaux, ont dégagé une conception de la connaissance pour laquelle le sujet et sa représentation du monde s'auto-constituent dans la dynamique de leurs relations mutuelles. L'approche phénoménologique s'offre ainsi comme alternative à l'approche computationnelle. Elle envisage l'intelligence comme le langage en tant que phénomènes d'émergence, et tend à ré-examiner les relations entre fonctions perceptives et fonctions intellectives. Leur signification apparaît ainsi non plus comme préalablement déterminée à partir d'une correspondance biunivoque avec un système formel calculant, mais comme situations provisoires d'équilibre se constituant au prix d'ajustements adaptatifs dans un contexte donné. Un tel paradigme rejoint certaines conceptions récentes de l'histoire des sciences, plus soucieuses d'analyses locales que de fresques généralisantes, et qui tendent à resituer, non seulement la vie, mais l'œuvre des savants, dans un contexte qui éclaire les présupposés et les enjeux philosophiques d'apports scientifiques trop souvent envisagés comme se suffisant à eux-mêmes. C'est ce clivage entre deux formes de constructivisme qui est examiné ici d'un point de vue historien, dans le cadre des situations, socialisées et socialisantes, où il s'est élaboré, afin d'apprécier leurs points communs et leurs lignes effectives de démarcation.

L'HÉRITAGE DE LA SCIENCE CLASSIQUE

Lorsque la science classique s'édifie comme science expérimentale aux XVI^{ème} et XVII^{ème} siècles, elle s'impose d'abord comme étude du mouvement, sous la forme d'une physique fondée sur un calcul infinitésimal structuré parallèlement par Isaac Newton (1642-1727) et Leibniz. Cette physique s'établit ainsi comme science première et comme science exacte dans le processus même de sa mathématisation. Elle se donne pour visée la connaissance d'un monde matériel où le sujet, appréhendé depuis René Descartes (1596-1650) comme sujet pensant, joue le rôle d'un observateur extérieur, qui n'influe en rien sur la marche du monde. Dans sa fonction de « science normale » (Kuhn, 1983, pp. 21-70), elle assume pleinement la séparation entre ce sujet pensant et la matérialité du monde qui s'offre à la connaissance scientifique, séparation philosophiquement instituée comme une des garanties de son objectivité. Dès lors que cette science s'affirme comme expérimentale se trouve en effet crucialement posée la question récurrente de savoir comment l'expérience locale d'un sujet quelconque peut aboutir à une connaissance objective et universelle. Les protocoles expérimentaux qui se mettent en place ne sont pas identifiés comme processus de légitimation collective (Shapin & Schaffer, 1993), mais comme modes d'accès à une vérité absolue, dont la signification est celle du monde, supposée pré-exister à la connaissance. C'est dire que la science classique installe le sujet pensant comme un être épistémologiquement solitaire, coupé du monde qu'il observe et sur lequel il réfléchit, dans une posture d'indépendance et d'extériorité qu'Isabelle Stengers et Ilia Prigogine ont qualifié de quasi-divine (Prigogine & Stengers, 1979, pp. 88-89).

Avant la réflexion spécifique d'Emmanuel Kant (1724-1804) sur les formes d'adéquation au réel des procédés déductifs et expérimentaux, l'existence de Dieu reste l'ultime recours pour légitimer l'universalité de la connaissance.

Mais deux types de présupposés sont alors explicités pour en garantir l'objectivité, qui impliquent des approches divergentes : l'innéisme rationaliste de Descartes d'une part, et l'empirisme de John Locke (1632-1704) d'autre part. C'est ainsi que, pour présupposer l'existence de vérités innées, claires et distinctes, Descartes fait suivre son affirmation du « Je pense, donc je suis » de la démonstration de l'existence de Dieu. Et si Locke fonde la formation des idées sur l'expérience de perceptions qui englobent sensations et réflexions, il en limite les possibilités du fait que les moyens dont dispose le sujet connaissant pour appréhender le monde sont exactement ceux dont le Créateur l'a pourvu dans ce but, et pour aucun autre. S'il renonce à la théorie aristotélicienne de la substance pour inaugurer une théorie de l'action, et s'il élabore une théorie du langage fondée sur l'arbitraire du signe, l'empirisme de Locke ne porte pas sur les facultés censées organiser les opérations de l'esprit, qui restent innées.

Quoi qu'il en soit de leurs divergences, Descartes et Locke partagent la même méthodologie, fondée sur deux hypothèses qui vont demeurer paradigmatiques au sein de la science classique.

La première suppose la compositionnalité des idées. Elle postule que toute idée complexe est composée d'idées simples, en lesquelles elle peut donc être décomposée. Et cette compositionnalité des idées renvoie à la compositionnalité du langage, au moins pour ce qui concerne le langage de la raison : universel, parfait, transparent au monde, structuré par une grammaire d'ordre syntaxique, il tire sa signification de son seul vocabulaire (Descartes, 1953, pp. 911-915). L'opérativité, non encore mécanique, mais en tous cas combinatoire, des idées et du langage est donc une composante essentielle de la théorie de la connaissance à partir du XVII^{ème} siècle. Chez ces mêmes auteurs, l'algèbre nouvellement produite constitue d'ailleurs une référence majeure pour penser la rationalité de cette langue philosophique qu'ils se proposent de reconstituer en dégageant la langue naturelle de la gangue d'ambiguïtés qui en obscurcit la perfection.

La seconde de ces hypothèses présuppose le monde à connaître comme un donné bien déterminé, pré-conçu en tant que création divine, et dont la connaissance rationnelle offrirait en quelque sorte le reflet.

Si la référence théologique se fait aujourd'hui plus discrète, ces deux hypothèses demeurent constitutives de toute épistémologie positiviste et réaliste. Dans cette perspective, le sujet connaissant n'est pas perçu comme acteur ou producteur des significations qu'il élabore, mais seulement comme décodeur exigeant et méthodique d'un monde qu'il ne fait que découvrir. Du geste de Galilée osant braquer sa lunette vers les cieux pour y déchiffrer une vérité accessible à la raison humaine (Galilée, 1992), au geste de Descartes imposant le choix d'une longueur unité pour substituer une écriture équationnelle à l'écriture de proportions dans les opérations sur les grandeurs (Descartes, 1897-1908, VI, 6), quelles que soient les initiatives de l'activité expérimentale et conceptuelle, la liberté du sujet connaissant n'est perçue que comme invention de méthodes spécifiques, n'intervenant pas sur la marche du monde.

EXPLICITER LA LOGIQUE DES OPÉRATIONS.

Dans l'approche constructiviste computationnelle, la nature du geste savant est du même type. Elle renvoie à un constructivisme méthodologique qui ne remet pas en cause la séparation classique entre le sujet et le monde, l'esprit et le corps. Ces hypothèses communes sur la nature et la forme de la connais-

sance restent à l'œuvre, dans la mesure même où elles ont servi de socle à son élaboration. Comme le montre le premier article de ce volume, elles restent partie prenante des conceptions de Charles Babbage (1791-1871) lorsqu'il élabore les plans de sa « machine analytique », et de celles de George Boole (1815-1864) lorsqu'il inaugure une étude de la logique qui la fait basculer du côté des mathématiques. Tous deux appartiennent à un même courant de pensée, celui des algébristes anglais, pour qui la philosophie de Locke constitue une référence majeure, et trop peu soulignée dans l'historiographie des sciences cognitives. C'est pourtant dans le cadre de cette philosophie que la légitimité des automatismes algébriques est attribuée à la pré-existence d'un calcul purement symbolique, radicalement premier, libre de toute interprétation, exprimant les opérations de l'esprit par des combinaisons de symboles arbitraires, mais découvert par une pratique mathématique érigée en « science de suggestion ». C'est à partir de ce présupposé que Babbage conçoit une machine analytique censée effectuer tous les calculs de l'analyse algébrique, et que Boole obtient une même écriture algébrique pour la logique des classes et celle des propositions. Outre le cadre philosophique lockéen, cette conception renouvelée des mathématiques et de la logique n'est pas indépendante du contexte de son élaboration. Ces algébristes interviennent au moment où, soucieux d'éviter une conflagration socio-politique à la française, les scientifiques réformateurs britanniques, précisément baptisés « scientists » par William Whewell (1794-1866) en 1833, œuvrent à intégrer à leur univers représentationnel les effets de la Révolution Industrielle, c'est-à-dire les acquis d'une expérience qui bouleverse radicalement le pays. Anglicans pénétrés de théologie naturelle, ils cherchent à expliciter un savoir qui pérennise les transformations du monde en symbolisant la nécessité et la permanence de lois qui puissent en assurer l'harmonie. Leurs travaux constituent une étape majeure dans la primauté accordée au caractère opératoire des transformations du monde, et à l'indépendance affirmée du calcul symbolique par rapport à la signification de résultats contingents, pourtant essentiels à la mise à jour de ses lois opératoires.

Bien avant le programme logiciste structuré par Gottlob Frege (1848-1925), la logique de Boole inaugure ainsi un rapprochement crucial entre la logique et les mathématiques, après plus de vingt siècles de raffinements poursuivis dans le cadre d'une analyse de la langue naturelle, initiée par Aristote, et prolongée par les écoles arabes et scolastiques. Cette affirmation du caractère opératoire de la pensée logique ou mathématique a cependant un prix. Contrairement aux conceptions de Leibniz et de Frege, qui revendiquent haut et fort la nécessité d'associer forme et contenu (Leibniz, 1966, pp. 350-57; Frege, 1971, p. 68), elle reconduit la philosophie de Locke en présupposant que cette indépendance entre puissance opératoire et signification du calcul est propre à l'innéité du fonctionnement des facultés de l'esprit. C'est ce même présupposé qui a nourri les tout premiers développements des recherches d'une intelligence artificielle, alors que la « crise des fondements » inaugurée par Frege et tranchée par Gödel avait déjà conduit les logiciens à renoncer à cette identification entre calcul symbolique et lois de l'esprit, et ouvert la possibilité de construire des logiques multiples, en choisissant librement leurs propres systèmes d'axiomes.

Les premiers développements de l'informatique conserveront ainsi les hypothèses paradigmatiques de la science classique sur le fonctionnement du langage et de la pensée, dans la mesure où, comme le souligne à juste titre l'ouvrage de Trogeman (Trodgemann & al., 2001, pp. 63-68), l'intrusion de la

logique dans les recherches sur les grands calculateurs provient avant tout d'une réflexion directe sur l'organisation de leurs systèmes de câblage. Cette logique, qu'il qualifie de « technique », est d'abord le fait des ingénieurs et des mathématiciens engagés dans la mécanisation des calculs de l'analyse numérique. L'architecture classique d'un ordinateur, telle qu'elle s'est imposée à la suite des travaux de John Von Neumann (1903-57), isole les mêmes fonctions opératoires que la « machine analytique » de Babbage : mémoire, unité de calcul, organes de contrôle des opérations, organes d'entrée et de sortie des données. L'objet même des calculs est d'ailleurs initialement le même : il porte sur les méthodes d'approximation des solutions d'équations différentielles pour lesquelles les solutions analytiques font défaut. L'ordinateur s'inscrit directement dans la lignée de ces grands calculateurs, réalisés pour effectuer les tables de calcul indispensables à ces résolutions approchées, de la première machine aux différences de Babbage à l'analyseur différentiel de Vannevar Bush (1890-1974). Ces travaux sont également portés par des exigences géopolitiques, de celles d'une astronomie au service de la navigation britannique, jusqu'aux implications des sciences lors de la Seconde Guerre Mondiale et de la Guerre Froide, où la maîtrise des problèmes de l'analyse mathématique est un enjeu stratégique directement lié aux problèmes de défense, que ce soit pour le calcul balistique des tables de tir, pour la mise au point de la bombe atomique, ou pour le contrôle stratégique du territoire (Edwards, 1997). Ces exigences mobilisent militaires, industriels et universitaires, autour de programmes de recherche menés au sein d'institutions spécifiques, coordonnés par la défense, l'industrie, et l'université. Elles déboucheront, aux États-Unis, sur la réalisation de l'EDVAC (Electronic Discrete Variable Computer) entre 1944 et 1952, en Angleterre, sur celle du Manchester Mark I, entre 1946-48, et sur des avancées semblables, souvent moins connues, en ex-URSS. Le calculateur deviendra ordinateur dès que sera réalisé le codage des instructions, qui permet d'automatiser non seulement les calculs, mais les programmes, désormais enregistrés et mémorisés à l'intérieur de la machine. C'est ainsi dans le cadre d'une symbolisation des aspects techniques du calcul, plutôt qu'à partir d'une réflexion philosophique sur la nature de la logique, que mathématiciens, physiciens et ingénieurs vont ainsi transférer le calcul des nombres aux symboles.

Lorsqu'à la Conférence de Darmouth (New Hampshire) en 1956, John McCarthy, Marvin Minsky, Herbert Simon et Alan Newell s'accordent pour qualifier d'Intelligence Artificielle le domaine de recherche lié à la théorie des automates abstraits, ils sont beaucoup plus sensibles à l'immense ouverture que constitue cette possibilité de calculs symboliques entièrement automatisés qu'aux limitations conceptuelles induites par les travaux de Kurt Gödel (1906-78), qui auraient pu les inciter à la prudence (Ladrière, 1992). L'identification métaphorique de ce calcul symbolique à l'intelligence s'effectue, dans un premier temps, sans ré-interroger la séparation corps-esprit. Les débats qui interrogent la notion d'Intelligence Artificielle tout au long de la seconde moitié du XX^{ème} siècle, et auxquels nous convie l'article de Brigitte Chamak, manifestent les difficultés du long travail de redéfinition de cette frontière, à la lumière du nouveau champ de recherche que constituent les sciences cognitives.

VERS UN NÉO-MÉCANISME DES OPÉRATIONS DE L'ESPRIT

Cette tendance à l'identification homme-machine va s'inscrire dans le vocabulaire au lieu même de la rencontre entre logique et calcul. Lorsque Claude

Shannon (1916-2001) établit un isomorphisme entre le calcul booléen sur la logique des propositions et les circuits électriques à relais et commutateurs, il rend possible la substitution du discours de la logique au vocabulaire numérique et technique de l'ingénieur. Le codage en nombres entiers de toutes les opérations d'une preuve, inauguré par Gödel, permet de remplacer le système de câblage externe des grands calculateurs par un programme interne stocké en mémoire : tout raisonnement formalisé devient susceptible de devenir manipulation de symboles (phrases, mots, dessins, opérateurs) selon des règles elles-mêmes décrites par des symboles. Le calcul séquentiel discret peut alors intervenir, non plus seulement comme approximation de solutions dans le domaine du continu, mais en s'imposant comme premier et fondamental.

D'un point de vue sociologique, la possibilité de mécaniser concrètement ces opérations attribuées à l'esprit conforte les approches matérialistes, si prégnantes depuis le XIX^{ème} siècle, et considérées alors comme progressistes. Parallèlement, les tentatives de quantification de l'intelligence qui se sont développées dans les secteurs de la psychologie et de la pédagogie depuis le début du XX^{ème} siècle renforcent l'importance accordée aux mathématiques dans ses modes de caractérisation. Et ce constructivisme computationnel interne, qui préside au fonctionnement des machines informationnelles, offre des perspectives suffisamment puissantes pour fortifier l'espoir d'être parvenu à reproduire une intelligence conçue comme source de la supériorité de l'humain sur le règne animal. A l'époque de la conférence de Dartmouth en 1956, le programme "Logic Theorist" parvient précisément à démontrer automatiquement plusieurs dizaines des théorèmes mathématiques des *Principia Mathematica* (1910) de Bertrand Russell (1872-1970) et de Alfred N. Whitehead (1861-1947), fleuron du programme logiciste du début du siècle !

L'article de Turing de 1950, "Computing Machinery and Intelligence", joue également un rôle essentiel dans cette tendance à identifier esprit et ordinateur. Il ne se hasarde pourtant pas à chercher une quelconque définition de l'intelligence ou de la pensée, dont il affirme qu'elle ne pourrait relever que d'une évaluation statistique. Se projetant cinquante ans plus tard, il se contente d'envisager la possibilité de ne pouvoir déceler la substitution d'un ordinateur à un homme dans un jeu particulier qu'il définit comme le jeu de l'imitation (Lassègue, 1998, pp. 146-200). Et là encore, il n'utilise que des critères statistiques. Mais, avant même la commercialisation des ordinateurs, il rend manifeste leur capacité d'autonomie, de vitesse de calcul, précisant leurs caractéristiques de machines à états discrets, et de machines universelles. Il répond surtout à l'avance à une longue liste d'éventuelles objections à cette identification homme-machine, se jouant malicieusement des arguments en faveur de la supériorité supposée de l'humain, dont il se plaît à souligner l'ancrage théologique. De nombreux auteurs feront pourtant écho à sa démarche, identifiant les états mentaux aux états logiques d'une machine, envisageant même la tâche à venir des philosophes comme un travail visant à substituer au langage de l'affectivité celui de ces catégories logiques, qui informerait l'humain sur les processus internes plutôt que sur des impressions subjectives ! (Anderson, 1983)¹.

Le principe du codage des instructions n'est pas seulement essentiel du point de vue technique de l'enregistrement des programmes. Depuis les années

¹ Tous ces textes sont traduits dans cet ouvrage avec l'article de Turing. Une longue préface de G. Guièze précise les difficultés inhérentes à la théorie du sens ainsi présupposée.

1930, la convergence des recherches qui le soutiennent, relatives à la théorisation de la notion d'algorithme, a renforcé le caractère d'universalité accordé au calcul. La théorie des fonctions récursives de Gödel, le lambda-calcul d'Alonzo Church (1903-95), la machine – théorique – de Turing, tout comme la logique combinatoire de Curry et les algorithmes de Markov, dont Turing établit l'équivalence en 1937, débouchent sur une théorie de la calculabilité, dont la richesse est telle que son exploration va mobiliser l'essentiel des recherches. Alors même que les paradoxes issus de la réflexivité du langage, longtemps cantonnés dans le champ de la philosophie, font irruption en logique mathématique en menaçant tout à la fois le programme logiciste et la théorie des ensembles², le concept de récursivité offre une solution constructiviste interne, au problème de l'auto-référence de la langue naturelle, et à celui de la décidabilité en logique mathématique. Ainsi, non seulement la quantité des calculs effectués par ordinateur est telle qu'elle échappe à toute prévision strictement humaine, mais l'analyse des mécanismes du calcul permet de raffiner la question de la compositionnalité du langage en examinant les limites du calculable. Qu'une machine soit susceptible de calculer un nombre énorme – mais cependant fini – de possibilités, reste un événement considérable : encore faut-il que le temps de calcul – même fini – conserve un intérêt à l'échelle du temps humain. Ce besoin de mieux spécifier la faisabilité des calculs, liée au problème de l'explosion combinatoire, va renouveler l'étude de la relation du fini à l'infini, et amener les informaticiens et logiciens des années 1960 à définir le concept de complexité algorithmique. Pierre Livet fait ici le point sur les caractéristiques de cette immense puissance de la récursivité, dont l'exploration concerne aussi bien l'approche computationniste que l'approche connexionniste.

Là où il fournit une effectivité aux notions de calculabilité mécanique et d'auto-référence, le concept de récursivité permet à l'approche computationnelle de fédérer les recherches en sciences cognitives, tout en restant d'abord dans le cadre d'une philosophie de l'esprit. La cognition peut être envisagée comme une activité de calcul sur des représentations symboliques, sans déroger aux présupposés nécessaires à l'affirmation de l'objectivité scientifique : le sujet connaissant, extérieur au monde, et maître de ses opérations mentales, persiste à extraire les informations d'une réalité qui lui est extérieure, et préalablement signifiante.

Le théorème d'incomplétude de Gödel indiquait pourtant dès 1931 l'impossibilité de réduire la vérité mathématique à la démontrabilité formelle, une impossibilité ruinant tout espoir théorique de produire une langue logique parfaite, susceptible d'englober toutes les langues. Cette limite inhérente au caractère syntaxique des théories formalisées impose en effet de renoncer définitivement, et tout à la fois, à l'ambition logiciste de réduction des mathématiques à la logique, et à celle de réduction du langage naturel à un langage formel. Les premiers chercheurs en Intelligence Artificielle, impliqués comme ils l'étaient dans la réalisation des premiers langages de programmation, se sont pourtant engagés dans la recherche d'un algorithme universel de résolution de problèmes, trop absorbés par l'exploration enthousiaste de cette constructivité interne des langages symboliques pour prendre en compte

² L'impossibilité d'écrire en extension les éléments d'un ensemble dont la définition comporte une clause non-prédicative bouscule en effet le principe de compréhension, traditionnellement admis en philosophie, selon lequel à tout concept correspond une classe d'objets qui le satisfasse.

immédiatement les difficultés du travail de formalisation, préalable pourtant nécessaire à la présentation d'un énoncé sous forme d'instructions. Scientifiques et ingénieurs restent pénétrés des présupposés de la science classique, où la valorisation de la certitude du raisonnement, fondée sur son caractère univoque et sur le présupposé des opérations de l'esprit, privilégie une conception strictement logicienne de la question de la signification du langage naturel, associant un dictionnaire à entrées univoques à une syntaxe purement formelle. L'universalité de ces calculs ne concerne pourtant que l'équivalence entre deux machines, c'est-à-dire entre deux modes de formalisation : elle ne dit rien de la possibilité de formaliser n'importe quelle activité cognitive.

Cependant, face aux difficultés soulevées par l'explosion combinatoire des calculs dans les ordinateurs, et par la divergence brutale entre les résultats et les situations réelles dès lors que la formalisation du raisonnement dépasse le cadre de la logique ordinaire, les « nouvelles logiques », souvent qualifiées de déviantes, constituent autant d'hypothèses qui bousculent le présupposé d'une logique binaire des opérations de l'esprit : elles brisent notamment avec le principe du tiers-exclu et avec la vérifonctionnalité des propositions, et permettent d'aborder les formes de raisonnement produites en situation d'incertitude. Jean Lassègue montre ici comment Turing lui même va déplacer l'analyse de cet auto-engendrement de la pensée, d'un constructivisme computationnel interne, logico-algébrique, fondé sur la notion d'acte mental, vers un constructivisme génétique plus soucieux de la constitution des formes du vivant.

DE LA RÉCURSIVITÉ À LA RÉTROACTION : VERS UN CONSTRUCTIVISME PHÉNOMÉNOLOGIQUE

Parallèlement à cette théorisation des processus auto-référentiels au sein de la logique, la possibilité qu'un résultat puisse être réinvesti dans le processus de calcul comme une donnée débouche également, et avant même la mutation calculateur-ordinateur, sur d'autres interprétations de la place et de la signification de l'opérateur dans la modélisation de l'acte de connaître, envisagé cette fois comme phénomène adaptatif. Dès 1943, le mathématicien Norbert Wiener (1894-1964), l'ingénieur Julian Bigelow (1913-) et le cardiologue Arthur Rosenblueth (1900-70), à partir d'une analyse comparative de l'inhibition cérébrale et de la simulation de trajectoires pour la défense anti-aérienne, définissent les concepts fondamentaux de ce qui deviendra en 1948 la cybernétique, envisagée comme « l'étude de la commande et de la communication chez l'animal et dans la machine ». A peine nommée, la cybernétique prend ainsi pour objet l'analyse des processus susceptibles d'assurer la finalité et l'autonomie d'une action dont le déroulement n'est pas entièrement déterminé à l'avance. Si les travaux de Wiener ont initialement lieu dans le cadre des conceptions de la science classique, puisqu'il s'agit d'abord de maîtriser un mouvement par approximations successives de sa trajectoire³, les concepts retenus comme fondamentaux – comportement, rétroaction, finalité – vont permettre d'élargir l'étude du mouvement au traitement de l'information. En affirmant comparer « l'animal » et « la machine », la cybernétique évite toute nécessité de recourir à un quelconque mental, et préfère la catégorie du vivant à celle de l'humain pour tenter d'explicitier les caractéristiques d'une action autonome. A l'analyse du fonctionnement de l'esprit se substitue celle du

³ Donc encore une fois de résoudre une équation différentielle par approximations numériques successives.

déroulement de l'action elle-même, envisagée localement et comme processus dynamique d'équilibrage entre deux systèmes, dont chacun puisse être indifféremment naturel ou artificiel. Au même moment, toujours en 1943, la modélisation des opérations de la logique propositionnelle par un réseau de circuits électroniques élémentaires, métaphoriquement qualifiés de neurones formels, conforte cette potentialité de matérialiser l'activité mentale en se référant directement au cerveau plutôt qu'à l'esprit. L'ambition du neuropsychiatre Warren McCulloch (1898-1969) et du neurophysiologue et mathématicien Walter Pitts (1923-69), sur les traces de l'école de biophysique mathématique de Nicolas Rashevski (1899-1972) à Chicago, est alors de réaliser une neurobiologie des opérations de l'esprit. Leur problématique se nourrit d'une forme de matérialisme hérité de l'empirisme logique du Cercle de Vienne : Pitts a suivi les cours de Rudolf Carnap (1891-70) à Chicago et le symbolisme utilisé dans l'article de 1943 lui est directement emprunté. Avec la cybernétique et les réseaux neuronaux, l'information va se substituer au codage, et la rétroaction à la récursivité, modifiant le lieu de la coupure entre opération de calcul et activité signifiante. Jérôme Ségal retrace ici le contexte et les conditions d'élaboration de cette nouvelle perspective, en analysant ses implications épistémologiques.

Après des débuts peu spectaculaires, affadis par les prouesses techniques si prometteuses des premiers ordinateurs, les réseaux neuronaux offrent depuis les années 1970 la perspective d'une modélisation alternative à l'approche computationnelle, qui dépasse la seule réponse aux revers subis par celle-ci dès qu'elle s'est éloignée des domaines formellement les plus circonscrits. Au projet de McCulloch et Pitts d'une « incarnation de l'esprit » reflétant ses fonctions logiques s'est substituée une modélisation à la fois plus souple et plus complexe⁴ des actions finalisées en général, où le rôle majeur revient aux connexions entre des automates élémentaires fonctionnant cette fois en parallèle. La modification des forces de liaison que constituent ces connexions, appelées poids synaptiques, permet d'adapter le résultat calculé à l'objectif visé, offrant ainsi une représentation délocalisée – répartie ou distribuée – des phénomènes d'adaptation ou d'apprentissage. La description des modes de calcul au sein de la microstructure neuronale peut désormais différer de celle de l'action obtenue, dont la macrostructure apparaît comme une forme d'équilibre à laquelle parvient la dynamique du système au terme d'un processus de réponses à des perturbations. Alors que le traitement des informations par un ordinateur classique suppose une stricte formalisation préalable du problème à traiter, les réseaux neuronaux permettent de modéliser des problèmes aux hypothèses de travail moins strictement spécifiées, et donnent des réponses plus fiables en situation d'incertitude. De la représentation computationnelle à la représentation connexionniste de l'action, la relation entre performance et compétence se trouve inversée : détermination prédéfinie des performances dans le premier cas, la compétence devient structure émergente issue de ces mêmes performances dans le second.

⁴ Dans le domaine des réseaux neuronaux, après les réseaux à deux couches d'unités de calcul (une couche d'entrée et une couche de sortie) ont été étudiés aussi bien des réseaux multicouches (avec une ou plusieurs couches cachées de neurones), que les automates cellulaires ou les réseaux récurrents. Le renouveau d'intérêt pour le parallélisme des calculs, présent dans les premiers calculateurs, mais un temps abandonné devant les premiers succès du calcul séquentiel, s'est également trouvé alimenté par la mise au point des ordinateurs multi-processeurs.

En ce qui concerne le mode d'élaboration de la connaissance du monde par le sujet, cette perspective issue de la cybernétique conduit à renoncer au présupposé du primat de l'intelligence humaine, pour s'appuyer sur les phénomènes d'émergence de formes, et concevoir l'intelligence elle-même comme une forme d'adaptation parmi d'autres. De la récursivité à la rétroaction, la constructivité et l'autonomie ne se lisent plus comme des *a priori* fonctionnels internes au système étudié – « l'animal » ou la machine. Elles se trouvent transférées à l'extérieur du système, pour s'auto-constituer localement dans l'adaptation du système à son environnement. Cette perspective débouche sur un constructivisme plus radical, susceptible de concerner non seulement la représentation de l'intelligence, mais celle de la relation entre l'humain et son environnement, pour déboucher sur une conception constructiviste de l'humain lui-même.

CONNAISSANCE OU COGNITION : ENTRE SCIENCE ET PHILOSOPHIE

Ces réseaux neuronaux, dont l'inspiration physiologique est évidente, alimente en effet une nouvelle représentation des processus cognitifs, qualifiée de néo-connexionnisme, et qui déplace la référence à l'esprit, restée centrale dans l'approche computationnelle. Le rôle accordé aux interactions entre le réseau et son environnement y soutient un constructivisme aux conséquences épistémologiques plus radicales que celles du constructivisme logico-mathématique. En sortant du cadre strictement opératoire pour s'ouvrir à des interprétations extérieures au strict champ du calcul, ce nouveau constructivisme s'offre comme une alternative possible au réalisme métaphysique et scientifique, en ce sens que la connaissance n'y apparaît plus comme réflexion ou extraction des significations d'un monde déjà là, mais comme médiation équilibrante par laquelle le sujet connaissant et sa représentation du monde se trouvent eux-mêmes construits dans l'exercice de leurs relations mutuelles. La vision dynamique de la connaissance que soutient ce nouveau constructivisme puise ses références dans des champs de recherche devenus majeurs au XX^{ème} siècle, comme la *Gestalttheorie* de Wolfgang Köhler (1887-1967), la théorie des systèmes de Ludwig von Bertalanffy (1901-72), la phénoménologie d'Edmund Husserl (1859-1938), l'épistémologie génétique de Jean Piaget (1896-1980), et les nouvelles orientations d'une philosophie des sciences devenue sensible aux multiples facettes du contexte historique de leur élaboration. Elle fait perdre au sujet connaissant son statut de penseur « épistémologiquement solitaire » cher à Descartes, pour le replonger dans un environnement où il est à la fois sujet et producteur, parmi d'autres, des représentations du monde qui correspondent à l'appréhension située et datée qu'il s'en est forgée.

Malgré les succès dont jouit l'approche computationnelle depuis l'existence des ordinateurs, les épistémologies positivistes et réalistes rencontrent dans le constructivisme phénoménologique un concurrent d'autant plus sérieux que la science s'est déployée, depuis le XVII^{ème} siècle, dans des champs bien plus vastes que la seule physique classique, comme la chimie, la physiologie ou la biologie. Elle étudie non seulement des phénomènes matériels, mais des phénomènes fonctionnels, qui interrogent bien davantage la nature des objets du discours scientifique. Explorant l'infiniment petit et l'infiniment grand, elle envisage aujourd'hui des échelles de temps bien plus considérables qu'au XVII^{ème} siècle, et prend en compte la description des phénomènes, non seulement dans leur fonctionnement présent, mais dans leur évolution à la fois

ontogénétique et phylogénétique. Ce faisant, elle aborde avec des outils plus puissants que les penseurs du XVII^{ème} siècle la question de la formation des idées ou de l'origine de la pensée, que Locke éludait d'une pirouette en affirmant qu'il n'était que philosophe, et non physiologue ! L'idée d'une connaissance reflétant la nature perd de sa pertinence dans ce contexte (Rorty, 1995). Dans une histoire à long terme, le projet unificateur que sous-tend l'ambition de constituer un savoir scientifique universel et objectif ne saurait se suffire à lui-même sans verser dans un absolutisme suspect : il a besoin d'être soutenu par une interrogation constante, tant sur le plan technique que symbolique, quant à ses présupposés et ses protocoles d'élaboration, de légitimation et de diffusion.

C'est en effet sur la question du lieu d'élaboration de la signification des connaissances humaines ainsi produites que le paradigme computationnel et l'approche constructiviste radicale s'opposent avec le plus d'âpreté. L'approche computationnelle persiste à soutenir une représentation objectiviste du monde, du sujet connaissant et de la relation de connaissance. Il envisage la cognition comme une computation sur des représentations symboliques, et assimile le fonctionnement du langage de la pensée, à celui d'un système immatériel et autonome de symboles dénués de toute signification, sous-jacent à tout langage particulier. En ce sens, de Noam Chomsky à Jerry Fodor, il ne déroge en rien à la lignée des travaux présupposant une langue universelle, logique et parfaite (Chomsky, 1969). Mais une question essentielle y est laissée en suspens : la question de l'intentionnalité. En envisageant le fonctionnement de l'esprit comme celui d'un ordinateur traditionnel, l'approche computationnelle ne se donne pas les moyens de comprendre comment des symboles manipulés formellement selon un ensemble de règles syntaxiques peuvent prétendre modéliser des processus signifiants. Il persiste à présupposer la signification comme un donné à saisir. Mais d'autres perspectives s'offrent comme alternative à l'hypothèse de compositionnalité des idées et du langage, et à celle d'une réalité extérieure préalablement signifiante. Elles s'appuient sur la théorie des formes et celle des systèmes dynamiques pour privilégier une approche topologique du sens, conçue comme construction dynamique, et modélisable par des réseaux connexionnistes récurrents (Victorri & Fuchs, 1996 ; Visetti, 2002).

Dès lors que les sciences cognitives tentent de s'approprier non seulement l'analyse de la structuration du langage ou d'activités intellectuelles comme la logique ou les mathématiques, mais aussi le discours sur la caractérisation du vivant, l'organisation du cerveau ou celle de fonctions physiologiques spécifiques comme la vision, il devient de plus en plus artificiel d'analyser les phénomènes étudiés en faisant abstraction de leur matérialité. C'est là que l'approche constructiviste radicale fait retour sur la phénoménologie pour réaffirmer l'importance du support matériel et le caractère essentiel de l'intentionnalité pour rendre compte des activités cognitives. Jean Petitot montre ici, sur l'exemple de la vision, comment des concepts de géométrie différentielle permettent de rendre compte de la notion husserlienne d'intentionnalité perceptive, et de la façon dont elle permet d'objectiver les vécus spatiaux. C'est cette fois l'appréhension visuelle de l'espace qui se lit non plus comme une donnée perceptive première, mais comme une construction dont cette entreprise herméneutique de naturalisation de la phénoménologie décrit l'élaboration en tant que forme élaborée à partir de perceptions locales. Là encore, l'espace visuel est analysé en tant que forme topologique, en référence aux travaux mathématiques de René Thom. Cette possibilité de traiter l'espace visuel

comme aboutissement d'un processus conduit à renoncer à l'immédiateté que lui ont si longtemps accordé les philosophes, de Platon et Descartes qui l'utilisaient comme métaphore de la limpidité de la connaissance, jusqu'à Kant qui l'installe dans le sujet comme une des deux formes *a priori* de l'intuition pure, préalable nécessaire à toute expérience.

Pour sa part, Francisco Varela, poursuivant cette déconstruction de la représentation engagée par la phénoménologie, envisage la cognition comme « enaction » du vivant, élaborant en même temps son autonomie et sa frontière par rapport au monde. Il débat ici avec François Sebbah de la difficulté à concevoir une circulation génératrice entre approche phénoménologique et approche scientifique⁵. La prise en compte de l'excès du sens sur le donné le conduit à envisager la science comme une recherche, porteuse d'une incomplétude constitutive toujours ouverte qui l'entraîne sans cesse au-delà de son attitude objectiviste.

Envisager la connaissance, non plus comme déchiffrement d'un monde déjà là et extérieur au sujet, mais comme représentation doublement constitutive du monde et du sujet, suppose que soit engagée une réflexion sur l'articulation des différents niveaux où elle se joue – perceptif, psychologique, linguistique – ainsi que sur ses conditions d'exercice – individuelles et collectives – et sur la signification qui peut lui être conférée. Comme cette présentation historiquement située des nouveaux modes de théorisation de l'acte de connaître a voulu l'indiquer, au-delà de leur spécificité opératoire, la signification des concepts qu'engagent ces représentations passe par des registres interprétatifs différents selon qu'ils sont intégrés à l'approche computationnelle ou à l'approche phénoménologique. Pierre Livet modère ainsi la puissance du calculable en spécifiant les limites techniques rencontrées, de la première cybernétique au néo-connexionnisme, dès qu'il s'est agi de représenter des propriétés métalinguistiques. Et Jean-Michel Roy souligne ici que, dans les débats sur l'autonomie de la biologie par rapport à la physique, ou sur celle de la psychologie par rapport à la neurobiologie, le fonctionnalisme et l'émergentisme ne répondent pas mieux l'un que l'autre à la question de la nature de l'explication causale : c'est dire que la réflexion sur le niveau de scientificité des différentes approches demande à être poursuivie parallèlement.

Faut-il parler du constructivisme émergentiste comme d'un nouveau paradigme ? Ressaisissant ces deux termes dans la pluralité de leurs acceptions, Yves-Marie Visetti préfère éviter cet enfermement, caractéristique de toute visée normalisante de la science. Parler d'approche constructiviste sans l'instituer en nouveau paradigme revient à rester au plus près d'une démarche scientifique qui d'une part, se nourrit sans cesse de la polysémie de la langue naturelle pour élaborer des nouvelles problématiques et intégrer des phénomènes ayant jusqu'ici échappé à son discours, et qui d'autre part, a besoin de fixer son vocabulaire conceptuel pour en proposer une structuration déductive. Et la question des niveaux d'articulation entre les différents registres de la cognition demeure suffisamment ouverte pour légitimer totalement cette précaution sémantique.

Bien qu'elle dispose d'instruments effectivement plus pointus qu'à l'aube des balbutiements du calcul infinitésimal, l'approche constructiviste radicale

⁵ Déjà souffrant au moment du colloque, Francisco Varela avait néanmoins accepté d'être partiellement présent au colloque et d'intervenir comme répondant à l'exposé de François Sebbah.

participe d'une conception de la connaissance possiblement moins présomptueuse qu'au temps où Descartes l'affirmait vérité porteuse de la maîtrise du monde. Réintroduisant le sujet dans le monde, elle est bien moins sûre de maîtriser l'ensemble des phénomènes, qui ne sont plus seulement matériels et naturels, mais fonctionnels et sociaux. Si ces nouvelles approches éloignent la référence à une ontologie de l'esprit, elles auraient tort d'oublier que cette spécificité des sociétés dites « chaudes », s'autorisant à penser l'autonomie du sujet, et l'universalité de la pensée, indépendamment de ses déterminations sociales. Que les nouvelles sciences de la cognition permettent de réintégrer le sujet dans le monde ne suppose-t-il pas que soit maintenue cette double exigence, tant philosophique que scientifique, de penser l'humain à la fois comme « sujet » cartésien et comme « animal politique » aristotélicien ? Dès lors que science et philosophie reconnaissent construire les représentations du monde qu'elles mettent en œuvre, l'effectivité des opérations de l'esprit ne suffit plus à en garantir la légitimité. Là où Babbage et Boole fondaient, sur les traces de Locke, jusqu'à la dimension éthique des mécanismes opératoires sur leur nature innée, dotée d'intentionnalité, l'exigence rationnelle bien comprise ne demande-t-elle pas que cette interrogation soit constante, dès lors que ces significations sont envisagées comme construites. Qu'elle soit scientifique ou philosophique, elle ne peut ignorer les enjeux politiques, économiques et sociaux d'une maîtrise collective des formes de l'autonomie, qu'elles soient humaines ou machiniques.

Avant de laisser le lecteur aborder ces textes avec ce regard historien cherchant à éclairer les transformations récentes du champ cognitif, je tiens à dire combien m'a été précieuse la rencontre avec les auteurs qui m'ont accompagnée dans cette démarche, et avec les collaborateurs de la revue *Intellectica* qui ont accueilli cette publication. Qu'ils en soient ici chaleureusement remerciés, ainsi que Dominique Flament⁶ qui m'a invitée à organiser le colloque préparatoire à la MSH.

Bibliographie

- Anderson, A.R. (1983). *Pensée et machine*. (Trad. française P. Blanchard). Paris : Champ Vallon. Coll. Milieux.
- Châtelet, F. (1992). *Une histoire de la raison*. Paris : Seuil, Collection Points Sciences.
- Chomsky, N. (1969). *La linguistique cartésienne*. Paris : Seuil.
- Descartes, R. (1637/1953). « Lettre à Mersenne, 20 novembre 1629 », in *Œuvres et lettres*, Paris : Gallimard, La Pléiade, p. 911-915.
- (1637/1897-1908). *La Géométrie*, Ed. Adam et Tannery. Paris. Vol. VI.
- Eco, U. (1994). *La recherche de la langue parfaite*. Paris : Seuil.
- Edwards, P. (1997). *The Closed World: Computers and the Politics of Discourse in Cold War America*. Cambridge (Mass.) : MIT Press.
- Frege, G. (1971). *Écrits logiques et philosophiques*. (Trad. française Cl. Imbert). Paris : Seuil.
- Galilée (1610/1992). *Le message des étoiles*. (Préface de F. Hallyn). Paris : Seuil.
- Kuhn, T. S. (1970/1983). *La Structure des Révolutions Scientifiques*. (Trad. française L. Meyer). Paris : Flammarion. Ed. Champs.

⁶ Équipe expérimentale F2DS : Formalismes, Formes et Données Sensibles : recherches historiques, philosophiques et mathématiques.

- Ladrière, J. (1957/1992). *Les limitations internes des formalismes : études sur la signification du théorème de Gödel et des théorèmes apparentés sur le fondement des mathématiques*. Louvain et Paris : Gabay
- Lassègue, J. (1998). *Turing*. Paris : Les Belles-Lettres, Coll. Figures du savoir.
- Prigogine, I. & Stengers, I. (1979). *La nouvelle alliance, métamorphose de la science*. Paris : Gallimard. N.R.F. Bibl. des Sciences Humaines.
- Rorty, R. (1995). *L'homme spéculaire*. Paris : Seuil.
- Shapin, S. & Schaffer, S. (1985/1993). *Léviathan et la pompe à air*. (Trad. française T. Piélat & S. Barjansky). Paris : La Découverte.
- Trogemann, G., Nitussov, Al. Y., & Wolfgang, E. (2001). *Computing in Russia. The History of Computer Devices and Information Technology revealed*. Vieweg. (Translated by A.Y. Nitussov).
- Turing, A. M. (1950). Computing Machinery and Intelligence. *Mind*, n° 59, p. 433-60, traduit dans : Turing, A.M. & Girard, J.Y., 1995, *La machine de Turing*, Paris : Seuil, Sources du savoir.
- Victorri, B., (avec la collaboration de Catherine Fuchs) (1996). *La polysémie. Construction dynamique du sens*. Paris : Hermès.
- Visetti, Y.-M. (2002). *Formes et théories dynamiques du sens*. Habilitation à diriger des recherches. Paris, Université Paris X.