

# HISTOIRE DES MATHÉMATIQUES

---

## Calcul, informatique et théorie de l'information

M.-J. Durand-Richard

---

### Une séance du séminaire d'histoire des mathématiques de l'Institut Henri Poincaré<sup>1</sup>

L'existence et la production massive de ce nouvel objet scientifique et technique qu'est l'ordinateur nourrit depuis une cinquantaine d'années un bouleversement à la fois philosophique et sociologique, qui va de l'émergence de l'intelligence artificielle et des sciences cognitives à une réorganisation des échanges, tant économiques que sociaux. Les études généralistes le concernant pullulent. Apologétiques ou critiques, elles tendent à décrire le phénomène à partir de l'urgente nécessité d'assimiler ses conséquences les plus manifestes, comme s'il résultait du seul développement naturel de l'esprit humain. Une telle perspective n'offre cependant aucun outil pour penser l'oubli dans lequel est tombée, un siècle plus tôt, la « machine analytique » de Charles Babbage (1791 – 1871), dont les plans correspondent pourtant à l'architecture von Neumann d'un ordinateur d'aujourd'hui. De fait, la prépondérance acquise par l'ordinateur dans la seconde moitié du xx<sup>e</sup> siècle s'enracine dans un contexte spécifique, celui de la Seconde Guerre mondiale, avec les nouvelles relations qu'elle installe entre l'université, l'industrie et l'armée aux États-Unis, et la transformation des champs disciplinaires qui en découle. La prise en compte de ce contexte permet de penser dynamiquement la façon dont l'ordinateur bouleverse jusqu'à la représentation de l'humain issue de la révolution scientifique du xvii<sup>e</sup> siècle : celle d'un humain dominant la nature, où l'étude des mouvements de la matière inerte est le fait des seuls scientifiques, tandis que l'étude de la raison, du libre arbitre et de l'autonomie de l'esprit, est laissée aux seuls philosophes. Si la machine « ordinateur » dispose aujourd'hui d'une autonomie suffisante pour que certains l'affirment intelligente, le chômage exclut du corps social bon nombre de personnes dont elle fait disparaître la fonction. Cette possible substitution de la machine à l'humain signifie-t-elle que son fonctionnement échappe au déterminisme, ou que l'humain n'est lui-même qu'une machine totalement déterminée ? Est-ce vraiment en ces termes que le problème se pose ?

---

<sup>1</sup> Au cours de cette séance, Amy Dahan-Dalmédico est intervenue sur « La pensée calculante dans les années 1950 », Pierre Mounier-Kuhn sur « Les demandes de calcul et leurs différentes réponses : le cas de la France » et Jérôme Ségala sur « Mathématiques et théorie de l'information : les travaux de Shannon ».

Mes remerciements vont aux intervenants de cette séance du séminaire du 28 février 2001, pour les indications bibliographiques qu'ils m'ont fournies, ainsi qu'à Hélène Gispert, pour son travail de relecture sur ce compte-rendu.

### La pensée calculante dans les années 1950

Face à ces questions, l'objectif de cette séance était donc d'analyser l'ordinateur, et les concepts qu'il recouvre, comme objets de science, en précisant leurs conditions historiques de production. Le panorama bibliographique qu'a présenté Amy Dahan-Dalmédico a focalisé l'attention sur le contexte spécifique de la Seconde Guerre mondiale et de la Guerre Froide, tandis que l'analyse de la situation de la France dans ce domaine, analysée par Pierre Mounier-Kuhn, a offert un éclairage *a contrario* sur les restructurations du champ scientifico-industriel liées au développement de l'informatique. En précisant ce que recouvre et ce qu'exclut la notion d'information, à travers les linéaments de sa conceptualisation, l'exposé de Jérôme Ségala a permis d'éclairer la part d'autonomie et la part de déterminisme de l'ordinateur, et de spécifier en quoi consistent les modélisations qu'il autorise. Au-delà de ses effets socio-économiques, la possibilité qu'offre l'ordinateur de traiter, à grande vitesse, un nombre considérable de données et de simuler les situations étudiées, confère en effet au concept de modèle une souplesse heuristique qui bouleverse jusqu'à la fonction sociale de la science.

Dans son exposé introductif, Amy Dahan-Dalmédico a dressé le panorama des différents types d'histoires de « la pensée calculante dans les années 1950 ». Celles qui se rattachent à l'histoire des idées ou à l'histoire des innovations conjuguent les références au progrès et au caractère révolutionnaire de cette avancée technologique. D'autres études, plus récentes, et aussi plus critiques, sont plus sensibles à l'inscription de ces recherches dans leur contexte et aux transformations du discours qui se constitue autour d'elles.

L'histoire des idées retient surtout le développement des mathématiques et de la logique. Tous les scientifiques qui participent à l'élaboration de l'ordinateur aux États-Unis, et plus largement de la cybernétique et de l'intelligence artificielle, héritent effectivement du foisonnement des travaux issus du mouvement de logicisation des mathématiques. Le programme formaliste de Hilbert n'a pas de secret pour un J. von Neumann (1903-57) ou un W. S. McCulloch (1898-1969). N. Wiener (1894-1964) a été l'élève de B. Russell (1872-1970) à Cambridge, W.H. Pitts (1923-69) a suivi les cours de Carnap à l'Université de Chicago en 1938. Les premiers travaux de von Neumann et d'Alan Turing (1912-54) s'inscrivent dans l'idéal de pure axiomatisation présent dans les trois questions fondamentales posées par Hilbert au Congrès de Bologne de 1928, portant sur la complétude, la consistance et la décidabilité des mathématiques [Hilbert, 1928]. Et tout Princeton a étudié l'article de Turing de 1936 sur la non-décidabilité des mathématiques (*Entscheidungsproblem*) [Turing, 1936]. Qui plus est, les thèses de l'atomisme logique, qui cherchent à isoler des faits irréductibles et logiquement indépendants permettant d'assimiler les constituants ultimes de la matière et de l'esprit, ne sont pas absentes des premières considérations d'un McCulloch imaginant le « psychon » comme entité élémentaire pour construire un calcul propositionnel des événements psychiques. Elles ont franchi l'Atlantique avec l'émigration des scientifiques juifs de l'Europe des années 1930.

Amy Dahan-Dalmédico a cependant insisté sur le fait que les travaux des mathématiciens dont les idées sont à l'origine des sciences cognitives ne sauraient être analysés comme relevant d'une histoire purement intellectuelle. Si la « machine de Turing », conçue en 1936, est une « machine de papier » digitale, si le « jeu de l'imitation » qu'il propose en 1950 vise à tester l'« intelligence » de l'ordinateur, le logicien qu'est Turing construit aussi dès 1937 à Princeton une machine à multiplier en binaire. En Grande-Bretagne, pendant toute la guerre, il travaille au sein du *Government Code and Cypher School*. Il s'occupe non seulement du décryptage des messages radio allemands, mais aussi d'un système de transmission numérique de la parole, mis en service dès 1943, qui servira aux dialogues directs entre Churchill et Roosevelt au début 1944.

L'article collectif qui constitue l'acte de naissance de la cybernétique, "Behavior, Purpose and Teleology", paraît en 1943. Cosigné par le mathématicien Wiener, l'ingénieur J. Bigelow (1913), et le physiologiste A. Rosenblueth (1900-1970), il établit des analogies fonctionnelles entre comportement machinique et comportement humain dans les phénomènes de régulation technique et biologique, en comparant l'action d'un tir de D.C.A. au geste d'un sujet humain, et en isolant la rétroaction comme facteur essentiel de l'activité volontaire non consciente. Lorsque le neuropsychiatre McCulloch et le mathématicien neurophysiologiste Pitts cosignent, toujours en 1943, "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity" – article qui marque, quant à lui, la naissance du connexionnisme [McCulloch, 1943] tous deux sont instruits des travaux de biophysique mathématique menés à l'École de Chicago autour de N. Rashevsky (1899-1972). Ils y établissent l'équivalence formelle entre la logique propositionnelle et un réseau de neurones envisagés comme organes de transformation de signaux électriques. Quant à von Neumann, la comparaison qu'il établit plus tard entre le cerveau et l'ordinateur [von Neumann, 1958] est nourrie de recherches ciblées, alors qu'il est consultant de l'*Army Ordnance Department* depuis 1937, associé dès 1943 au *Manhattan Project* de Los Alamos pour fabriquer la bombe atomique, puis des bombes thermonucléaires. Le président Eisenhower le nomme membre du Comité consultatif général de la *Commission à l'énergie atomique* en 1952. On ne saurait donc négliger le fait que tous ces travaux sont issus de réseaux constitués pendant la Seconde Guerre mondiale autour de systèmes d'armes automatisés dont l'homme et la machine sont des éléments, sinon interchangeable, du moins constitutifs.

Les historiographies de l'innovation, de type socio-économique, insistent davantage sur ce qui caractérise l'ordinateur comme dispositif matériel, sur ses capacités techniques, sur les progrès technologiques qui ont accompagné sa conception, ainsi que sur son enracinement dans un monde d'ingénieurs qui n'ignorent pas les travaux des logiciens. D'autres acteurs entrent alors en scène. L'analyseur différentiel de Vanevar Bush (1890-1974), calculatrice analogique mécanique mise au point en 1929 pour la résolution des équations différentielles, y tient le premier rôle : elle est jusque dans les années 1940 la plus puissante machine permettant de faire des calculs scientifiques. Et les énormes besoins en calcul de la Seconde Guerre mondiale, tant en balistique qu'en mécanique des fluides ou thermodynamique des gaz, voient se succéder rapidement de nombreux grands calculateurs digitaux<sup>2</sup>. Après le calculateur binaire à relais que construit Stibitz en 1937 pour les *Bell Telephone Laboratories*, ce seront : le MARK I (1937-44), calculateur électromécanique réalisé par H. H. Aiken pour IBM, l'ABC (1939-42) électronique de J. V. Atanasoff et C. Berry, qui inspire directement l'ENIAC (1943-45) de J. P. Eckert et J.W. Mauchly, construit à la *Moore School of Electrical Engineering* de l'Université de Pennsylvanie, à Philadelphie.

L'idée essentielle qui conduit à séparer la conception logique de la machine de celle de ses circuits électriques et de lui fournir un programme enregistré est formulée en 1944. Elle convertit les calculateurs en ordinateurs : à l'ENIAC (*Electronic Numerator Integrator Analyzer and Computer*) succède l'EDVAC (*Electronic Discrete Variable Computer*). Si l'histoire intellectuelle attribue celui-ci à von Neumann, les conflits ultérieurs avec les ingénieurs Eckert et Mauchly témoignent du caractère éminemment collectif de son élaboration<sup>3</sup>. Elle impose pour plusieurs dizaines

<sup>2</sup> Les calculateurs analogiques représentent des variables mathématiques par des grandeurs physiques mesurables. Des calculateurs de tir furent ainsi construits pour déterminer les trajectoires des obus : les nombres y étaient représentés par des valeurs de tension ou d'intensité d'un courant électrique dans un circuit. Au contraire, les machines digitales, en particulier binaires, effectuent des calculs discrets, à partir d'algorithmes sur des nombres.

<sup>3</sup> Ces conflits retarderont suffisamment les travaux pour que le premier ordinateur effectivement mis en service le soit en Angleterre. Ce sera le *Manchester Mark I*.

d'années l'architecture dite von Neumann et le fonctionnement séquentiel de ces machines, au détriment du fonctionnement en parallèle qui fera surface avec le néo-connexionnisme. Avant les techniques de miniaturisation des ordinateurs, le Whirlwind (1944-1951), construit au laboratoire de servomécanisme du MIT, avec sa possibilité d'effectuer des calculs en temps réel, aura un impact considérable sur la tentation d'identifier l'ordinateur au cerveau humain.

Il convient de souligner que toutes ces machines, même expérimentales, sont construites à des fins militaires. Leur rapide évolution suppose, outre la résolution de nombreux problèmes techniques, une mobilisation financière et intellectuelle sans précédent, en tout cas sans commune mesure avec les efforts individuels d'un Babbage un siècle plus tôt, même s'il reçut 17 000 livres de subventions de la Couronne britannique tout au long de son travail sur les machines.

Face à ces deux types d'historiographie, l'ouvrage plus récent de Paul N. Edwards, *The Closed World, Computers and the Politics of Discourse in Cold War America*, insiste, non sur les idées de progrès et de révolution techniques et intellectuels, mais sur celles de contingence historique, de déterminations plurielles et de centralisation du pouvoir ainsi rendu possible. L'expansion remarquable de ces machines correspond effectivement au développement d'une technologie cruciale pour les forces militaires de la Seconde Guerre mondiale et de la Guerre Froide, pour laquelle l'homme, l'avion, le radar, le calculateur-prédicteur et l'artillerie sont organisés en un système unique de défense dans le cadre de la guerre anti-aérienne. Elle y apparaît comme le résultat de réorganisations à plusieurs niveaux, liant des choix politiques et des valeurs socialement constituées, où la technique apparaît comme le produit d'interactions intriquées entre scientifiques, ingénieurs, militaires et politiques. Comme le souligne Amy Dahan-Dalmédico, P. Edwards montre en particulier que le choix de développer l'ordinateur digital, loin de résulter de choix intellectuels clairs et explicites marquant la voie d'un inéluctable progrès, provient bien davantage d'une bifurcation technologique induite par certains choix politiques et certaines valeurs sociales entre 1944 et 1961. Après la guerre, le champ du calcul analogique reste fortement investi, appuyé sur des groupes sociaux bien organisés autour de cette technologie – dont le laboratoire de Servomécanisme du MIT offre un exemple caractéristique. Les calculateurs analogiques restent plus économiques, moins encombrants et bien plus performants que leurs homologues électroniques digitaux. Ces derniers sont en outre beaucoup moins fiables, beaucoup moins familiers aux équipes d'ingénieurs qui les conçoivent, et d'utilisation plus problématique en raison des problèmes de conversion entre le binaire et les données. Leur universalité n'est pas immédiatement perçue comme intéressante pour les applications et ils paraissent devoir rester cantonnés au domaine de la recherche. Alors que les choix militaires sont initialement orientés, après la guerre, vers la conception d'une guerre aérienne et nucléaire offensive, le test atomique (1949) et l'explosion de la bombe à hydrogène (1953) soviétiques vont renforcer le camp favorable à une politique de confinement et à un programme centralisé de défense totale<sup>4</sup>, baptisé SAGE, contre une éventuelle attaque de l'URSS. Dans ce contexte, la peur du nucléaire va transcender les termes du débat sur les mérites techniques et stratégiques en arguments d'ordre idéologique. Tous les enjeux sont désormais examinés à travers le prisme de la lutte du capitalisme contre le communisme.

L'originalité de l'ouvrage de Paul Edwards réside précisément dans le fait d'insister sur la centralisation de pouvoir qu'induit la gestion des problèmes de sécurité

---

<sup>4</sup> C'est dans ce cadre que le Whirlwind, initialement prévu comme un simulateur de vol analogique, va devenir l'instrument de cette surveillance tous azimuts, premier ordinateur à fonctionner en temps réel.

par ordinateur<sup>5</sup>, là où les autres types d'histoire s'attachent au contraire à souligner l'autonomie que suppose le fonctionnement systémique de cette machine. Il poursuit son propos en montrant que ce système C31 (commande, contrôle, communication et intelligence ou information) alimente aussi bien le discours cognitiviste qu'un discours métaphorique, à travers la référence au Cyborg (abréviation pour "cybernetic organism"), réduisant le fonctionnement du cerveau à celui d'un ordinateur. Là encore, la suprématie du fonctionnement digital ne s'est pas imposée d'emblée. De 1946 à 1953, la question de l'analogique ou du digital a fait l'objet de nombreuses discussions au cours des Conférences Macy<sup>6</sup>, puisque l'étude du système nerveux pouvait aussi bien être menée en utilisant des variables continues. Là où McCulloch et Pitts envisageaient le fonctionnement du neurone comme celui d'un amplificateur à seuil, Wiener utilisait le langage des systèmes dynamiques, et la tension entre leurs points de vue ira jusqu'au conflit. Les thèses de P. Edwards apparaissent d'autant plus pertinentes que le cognitivisme, fondé sur l'idée d'un fonctionnement strictement computationnel du cerveau, se trouve contesté, depuis les années 1970, par les conceptions du néo-connexionnisme, qui réorientent le discours du côté d'une représentation plus dynamique et interactive, voire émergentiste, de la connaissance.

### Les demandes de calcul et leurs différentes réponses : le cas de la France

Dans les années 1950, la situation de la France en matière d'ordinateurs est aux antipodes de celle des États-Unis. De tous les pays industrialisés, la France est le seul où la recherche publique n'a réalisé aucun ordinateur avant 1960. Parler de « retard technique » ne constitue pas pour P. Mounier-Kuhn une explication suffisante. C'est d'ailleurs une catégorisation refusée par les historiens. Les facteurs explicatifs les plus couramment évoqués en première analyse sont la capitulation et l'invasion allemande de 1940, ainsi que la priorité accordée après-guerre à la reconstruction. Qui plus est, l'informatique aura du mal à trouver sa place, par exemple dans la politique du CNRS, comme en témoignent les variations dans l'intitulé des commissions : ce n'est qu'en 1975, sous la pression du "Plan Calcul", qu'est créée une commission informatique consacrée au traitement du signal. Encore reste-t-elle dépendante des sciences de l'ingénieur. Et il est remarquable que dans les centres scientifiques qui, entre 1935 et 1955, ont entrepris de réaliser des calculateurs, les recherches n'aboutissent pas à la production d'ordinateurs : ni à l'Institut d'optique, ni à l'ONERA (Office national d'études et de recherches aéronautiques), ni au CNET (Centre national d'études des télécommunications), ni même au sein de l'Institut Blaise Pascal, pourtant créé à cet effet en 1946. Ces centres de recherches, dégagés des contraintes des sociétés commerciales, sont pourtant plus libres d'expérimenter des techniques, de promouvoir des concepts nouveaux.

Cet échec retarde d'autant la formation de spécialistes, ce qui n'est pas fait pour rapprocher la science et l'industrie. Il est souvent également rapporté à la domination des mathématiques pures en France, dans cette période d'après-guerre où s'imposent les travaux du Groupe Bourbaki, marginalisant à la fois les mathématiques appliquées et les travaux de logique. En 1950, la réforme de l'enseignement supérieur supprime

<sup>5</sup> Aux États-Unis cette visée d'un contrôle global du monde géré par un ordinateur se traduit concrètement par la mise au point de programmes conçus comme des systèmes clos, du programme SAGE pour les États-Unis au WMCCS (*World Wide Military Control and Command System*, 1961) censé contrôler la planète toute entière.

<sup>6</sup> du nom de la Fondation Josiah Macy qui a organisé dix conférences réunissant mathématiciens, cybernéticiens, ingénieurs, linguistes, anthropologues, neuroanatomistes, neurophysiologistes, psychologues et psychiatres.

le certificat de mécanique de la licence de mathématiques. Une telle restriction des domaines disciplinaires complique effectivement la coopération entre les différents secteurs d'activités qui, Outre-Atlantique, collaborent dès la construction des grands calculateurs. L'échec dans la construction de la machine universelle envisagée par Couffignal participe du même phénomène. Couffignal est sans aucun doute le cybernéticien le plus engagé dans le projet de construction d'un ordinateur en France [Ramunni, 1989]. Outre la faillite, en 1953, de Logabax, l'entreprise chargée de sa réalisation, l'échec du projet engage aussi les choix conceptuels et stratégiques de Couffignal. De retour des États-Unis, soucieux de promouvoir une « voie française », il s'engage sur une voie qui prend le contre-pied de ce qu'il a pu observer dans les laboratoires américains : il minimise le rôle de la mémoire, passant ainsi à côté de la notion de programme enregistré ; il envisage le progrès technique comme une entreprise de complexification du calcul et il privilégie à ce point la méthode déductive dans le domaine de la recherche qu'il subordonne totalement le technique au théorique, au moment où leurs échanges se révèlent particulièrement fructueux Outre-Atlantique. Pour P. Mounier-Kuhn cependant, ces facteurs, relevant de l'histoire récente, ne sauraient seuls suffire à rendre compte de ces difficultés. Ne serait-ce que parce que la domination des mathématiques pures est moins évidente lorsqu'on remonte dans le temps. Il existe une tradition de recherches en mathématiques appliquées, issue de la Première Guerre mondiale, à laquelle des mathématiciens aussi importants que M. Fréchet (1878-1973) et E. Borel (1871-1956) ont largement participé.

Et d'autres spécificités interviennent dès qu'on envisage effectivement une histoire de plus longue durée qui dépasse celle des souvenirs propres aux acteurs concernés. P. Mounier-Kuhn analyse la situation de la France depuis l'entre-deux-guerres, l'absence de traditions de calcul, l'absence d'un apprentissage à la fois technique et social, non seulement des machines, mais de l'organisation humaine qui les entoure. Dans les années 1930, les instruments utilisés restent essentiellement les tables numériques élaborées par les centres de recherche publics, la règle à calcul et les calechettes de bureau. L'analyseur différentiel de V. Bush, copié à Manchester, Copenhague, Stockholm, Oslo, et en Allemagne, ne sera pas reproduit en France. L'industrie électrique fait peu de recherches, et a donc peu besoin de calcul. L'aéronautique souffre de problèmes d'organisation industrielle qui ne permettent pas l'émergence de bureaux d'études assez étoffés pour attaquer sérieusement, par exemple, les problèmes de vibrations et de résistance des structures. La recherche en mécanique des fluides (hydrodynamique, aérodynamique) fait seule l'objet d'un programme de recherches national : elle réalise une machine analogique entre les deux guerres. Il s'agit des cuves rhéographiques de J. Pérès (1877-1962), ou calculateurs Malavard (du nom de son élève), qui simulent la circulation d'un fluide (par exemple les tourbillons de l'air autour d'une aile d'avion) en utilisant le fait que l'écoulement du courant électrique et celui d'un fluide sont régis par la même équation différentielle, celle de Laplace. Ce laboratoire de recherche sera intégré, avec celui de L. Couffignal, à l'Institut Blaise Pascal.

Le manque d'équipement et de besoins en calcul entre les deux guerres, ainsi que l'absence d'interactions entre sciences et techniques, sont pour P. Mounier-Kuhn les facteurs dominants. La situation de l'électrotechnique en France est spécifique : les entreprises concernées se contentent souvent d'exploiter des brevets étrangers. Les universités sont séparées des écoles d'ingénieurs et les cours d'électrotechnique peu fréquentés. Seuls deux étudiants suivent le cours sur les champs électriques de Le Corbeiller à l'École supérieure d'électricité dans les années 1930. Bien que le calcul soit la vocation première du Bureau des longitudes, celui-ci ne recevra aucun équipement nouveau entre 1900 et 1930. Et l'inventaire des machines dans les universités

avant-guerre témoigne de la même pénurie. Si les sciences de l'Univers sont assez gourmandes en calcul, les machines datent du début du XX<sup>e</sup> siècle, et il faut attendre 1938 et le « plan Tardieux » pour commencer à rattraper le retard qui s'est accumulé avec l'inflation galopante des années 1920, l'indexation des crédits universitaires et la déflation des années 1934-35 sous le gouvernement Laval. Pierre Mounier-Kuhn parle d'un véritable sous-développement de la France quant à ses équipements de calcul.

Certes, il existe un effort de mobilisation scientifique non négligeable dans les années 1930. L'Institut Henri Poincaré, créé par E. Borel en 1931 avec le soutien du banquier E. de Rothschild et de la Fondation Rockefeller, participe à l'effort de mobilisation scientifique suscité par l'Armée dans ces années, passant des contrats avec la Marine et l'Armée de Terre. Le CNRS est créé en 1939. La même année, les services secrets polonais réfugiés en France apportent leurs connaissances des machines cryptographiques allemandes, et la société Bull<sup>7</sup> met au point des casseurs de codes électromécaniques. Mais avec le retard en équipements, ces nouvelles demandes en calcul, notamment dans le domaine de l'électrotechnique, des réseaux de télécommunications et du transport de l'énergie électrique, vont créer un véritable goulet d'étranglement, phénomène classique en histoire des techniques. Et la capitulation de 1940 brise net cet élan. Tous les projets sont abandonnés ou détruits. Bien des scientifiques sont tués<sup>8</sup> ou faits prisonniers, soit se replient vers les mathématiques pures.

Après la guerre, la France rêve de retrouver le niveau de 1939-40, mais elle conçoit son équipement dans l'urgence, et, dans un premier temps, en raison des handicaps accumulés avant la guerre, avec la conception d'un univers technique qui est celui de la Première Guerre mondiale. Là où s'expriment le plus de besoins en calcul, on fabrique d'abord des calculateurs mécaniques et, de 1945 à 1948, le CNRS commande encore mille calculateurs de bureau. Le CNRS attendra six ans pour tirer les leçons de l'échec du projet de Couffignal.

La situation change radicalement dans les années 1950, avec l'instauration des grands programmes technologiques. C'est dans le domaine du nucléaire, tant civil que militaire, que vont surgir les besoins en calcul les plus importants, notamment au CEA. L'Association française de calcul<sup>9</sup> voit le jour en 1958, qui deviendra l'AFCEC, la Société savante des informaticiens. La construction des barrages EDF stimule les grands progrès des années 1950, avec notamment la création de l'Institut de mathématiques appliquées de Grenoble. Les changements les plus profonds interviendront dans les années 1960, où la nouvelle génération adopte des comportements nouveaux : scientifiques et ingénieurs sont désormais convaincus de l'utilité du calcul et des simulations qu'il autorise ; ils effectuent des stages dans les grands laboratoires américains, tandis que normaliens et informaticiens travaillent dans l'industrie. Trois chaires d'analyse numérique sont créées à Grenoble, Toulouse et Paris. La quête de précision issue de l'évolution technique rend manifeste les limites intrinsèques de l'analogique, dont l'augmentation des coûts concomitants à celle de la précision est exponentielle. Dans le développement des missiles par exemple, plus on gagne en précision, moins on a besoin d'explosifs, et plus on tire vite et loin. Qui plus est, comme l'écrivaient déjà von Neumann et Mauchly en 1947, la transposition du calcul digital aux tâches de gestion offre des possibilités d'amortissement tout à fait considérables. Par contre,

<sup>7</sup> La société Bull, fondée en 1932, produit des équipements électroniques de traitement de l'information. Elle réalise un petit ordinateur de gestion en 1959, qui est une réussite commerciale. Elle passe pourtant sous le contrôle de General Electric en 1964 après l'échec commercial du Gamma 60.

<sup>8</sup> Cavaillès et Lautmann sont tués par les Nazis.

<sup>9</sup> Elle est issue d'un groupe de calcul se réunissant à l'IHP depuis 1947 autour de E. de Lacroix, de Lavalette et de P. Belgodère.

les cuves rhéographiques, adoptées par Thomson en 1939, restent systématiquement utilisées dans la résolution des équations différentielles partielles, bouchant le marché des ordinateurs digitaux en ce domaine jusque dans les années 1960.

Les développements de l'informatique en France souffrent donc d'une inertie structurale qui s'enracine dans la période de l'entre-deux-guerres, et qui se caractérise par l'absence de synergie entre les différents domaines qui, Outre-Atlantique, participent à son élaboration : mathématiques et techniques, science, industrie et armée.

### Mathématiques et théorie de l'information : les travaux de Shannon

Au-delà de cette double analyse des conditions de production des ordinateurs dans les années 1950-60, l'intervention de Jérôme Ségala a permis de cerner les transformations conceptuelles qui accompagnent cette restructuration institutionnelle des champs disciplinaires. A travers l'étude des travaux de Claude E. Shannon (1913-2001), il a retracé les différentes approches qui ont conduit à l'élaboration du concept d'information, des premières études en télécommunications à son axiomatisation. Il a insisté sur la transformation de sens qui s'est opérée dans le basculement de cette notion, du langage courant au langage scientifique.

Si la théorie de l'information fut identifiée comme telle dans les années 1940, la mathématisation de la notion d'information trouve son origine dans les années 1920, où elle intervient dans plusieurs champs de recherche. En thermodynamique, l'américain Gilbert N. Lewis (1875-1946) l'aborde intuitivement en affirmant qu'« un gain d'entropie signifie toujours une perte d'information et rien de plus », au moment même où le physicien hongrois Léo Szilard (1898-1964) en propose une formulation mathématique comme base d'une solution au paradoxe du démon de Maxwell. Le cadre de ce rapprochement entre information et entropie, ainsi qu'entre physique stochastique et théorie mathématique des probabilités, est celui des études sur l'irréversibilité du temps et le mouvement brownien. Elles seront prolongées par les travaux de Wiener et von Neumann en mécanique quantique dans la période de l'entre-deux-guerres. Elles conduiront un des théoriciens de la mécanique quantique, le physicien français Léon Brillouin (1889-1969), à proposer en 1956 une réinterprétation de la physique autour de la notion d'information.

Toujours dans les années 1920, le statisticien, eugéniste et biométricien anglais Ronald A. Fisher (1890-1962) fera lui aussi le rapprochement entre processus irréversibles et perte d'information. La formalisation de cette notion participe de sa volonté de substituer le concept de vraisemblance à celui de probabilité bayésienne, qu'induit l'évolution de ses recherches agronomiques vers une théorie mathématique de l'estimation. Fisher cherche à caractériser le meilleur choix possible des paramètres définissant une distribution statistique. Il insiste sur l'unité méthodologique qu'offre le raisonnement statistique dans la diversité des populations étudiées. Son traitement quantitatif de l'information apportée par un échantillon trouve des prolongements jusque dans les années 1940, notamment dans les travaux de mathématiciens comme l'américain J. L. Doob et l'indien A. Bhattacharyya.

Pendant la même période, c'est la recherche d'une maximisation de la vitesse de transmission des messages dans le domaine des communications qui conduit à préciser la notion de signal, de codage et d'information. Des laboratoires industriels comme ceux de Siemens et Halske en Allemagne, ou les *Bell Laboratories* aux États-Unis – où les abonnés subventionnent une recherche qui mobilise déjà près de 1400 chercheurs et ingénieurs –, cherchent à rentabiliser les énormes financements des grands réseaux nationaux et internationaux. Disposant d'une solide formation en physique mathématique, des ingénieurs comme H. Nyquist (1889-1970) et R.V.L. Hartley (1888-1970) travaillent aux *Bell Laboratories* à maximiser la vitesse de transmission des messages,

et en donnent une expression quantitative qui prend en compte le choix des codes et la mise en forme du signal.

A partir de ces trois contextes se trouvent donc élaborées trois formulations mathématiques, qui co-existent à partir des années 1920, et où intervient une « quantité d'information », mesure de « l'intelligence » à transmettre, dont la forme logarithmique permet d'exprimer le caractère additif. Dans les trois cas, le point de vue est nouveau, spécifique et général : ce que mathématiciens et ingénieurs cherchent ainsi à symboliser, ce qui fait sens pour eux, ne concerne aucunement le contenu sémantique d'un message particulier, mais bien plutôt la mesure d'ordre qu'introduit un message spécifique dans l'ensemble des messages possibles.

La théorie mathématique de l'information va réaliser l'unification de ces trois courants. Elle prend forme dans le contexte spécifique de l'interdisciplinarité d'une recherche scientifique dont la Seconde Guerre mondiale renouvelle là aussi radicalement la structure, en accélérant le rapprochement des disciplines, tant sur le plan institutionnel que sur le plan théorique. La création de la *Moore School of Electrical Engineering* en 1923 à l'Université de Pennsylvanie à Philadelphie, comme celle du *Ballistic Research Laboratory* en 1935 favorisaient déjà la collaboration entre scientifiques, ingénieurs, industriels et militaires avant la Seconde Guerre mondiale. Cette collaboration va se trouver considérablement renforcée au sein du NDRC<sup>10</sup> (*National Defense Research Committee*) en 1940, devenu l'OSRD (*Office of Scientific Research and Development*) en 1941, et de la base de Los Alamos en 1942. Dès 1940, les cinq divisions du NDRC, dirigées chacune par le président d'une grande université ou d'un centre de recherche prestigieux, ont toutes des capacités d'initiative dans leur domaine propre, dans le cadre de contrats conclus entre l'armée et les différentes institutions impliquées. Aussi bien le calcul balistique des tables de tir pour la défense anti-aérienne que l'étude de la fission nucléaire instaurent de nouveaux besoins en calcul, et favorisent de nouveaux développements en statistiques, en analyse numérique, en théorie des ondes et en recherche opérationnelle.

Le travail et la carrière de Shannon s'inscrivent directement dans ce mouvement de restructuration des recherches autour de l'effort de guerre. Jeune inventeur diplômé en mathématiques et en ingénierie électrique, il entre au MIT dès 1936 comme assistant-chercheur. Il y travaille à la maintenance de l'analyseur différentiel, dont l'inventeur, V. Bush, a déjà participé à l'effort de guerre au cours de la Première Guerre mondiale et va organiser la mobilisation de la science pour la guerre en tant que président de l'OSRD à partir de 1942. Les idées du mémoire de *Master* de Shannon, « A symbolic Analysis of Relays and Switching Circuits », soutenu en 1937, sont immédiatement exploitées comme essentielles. En établissant que les circuits électriques formés de relais et de commutateurs peuvent être interprétés dans le calcul booléen, il permet de formaliser le fonctionnement de ces circuits par un calcul logique, et de les réduire à leur configuration optimale. Un champ entier de l'ingénierie électrique devient ainsi une application de la logique, ouvrant un programme de recherche qui installe au premier plan la question de la structure des circuits. Dès 1938, dans sa thèse de mathématiques, Shannon applique également l'algèbre de Boole à la génétique des populations - une génétique antérieure à l'identification de l'ADN en 1953 - tout en se démarquant d'un certain eugénisme ambiant.

Entré à l'*Institute of Advanced Studies* de Princeton en 1940, Shannon passe aux *Bell Laboratories* en 1941 pour travailler, avec H.W. Bode et R.B. Blackman, à la construction d'un appareil automatique de DCA, le M9 - opérationnel au cours de la seconde bataille d'Angleterre et du Débarquement - avant de s'orienter vers la

<sup>10</sup> Il est créé par Roosevelt le 27 juin 1940 pour fédérer l'ensemble des travaux menés dans des structures civiles, sauf les recherches aéronautiques, à des fins militaires.

cryptologie. Le MIT créera spécialement pour lui une chaire de théorie de l'information dans le département de génie électrique, qu'il occupera pendant plusieurs décennies. Du fait de la guerre, les besoins en cryptologie et les recherches en télécommunications se fécondent mutuellement et installent au premier plan la notion de code. La Première Guerre mondiale avait déjà conduit aux travaux du britannique W. Friedman (1891-1969), et à la mécanisation des étapes de chiffrement, dont la machine allemande Enigma (1926) constitue le fleuron. En Angleterre, Turing, installée à Bletchley Park avec la *Government Code and Cypher School* en 1939, réussira à en casser les codes. Il produit une mesure de l'information, mais ses travaux, classés « secret défense », tout comme la réalisation des machines à décrypter Colossus, ne seront accessibles qu'à partir des années 1970. Les développements issus de la mesure de l'information, notamment en analyse séquentielle et en théorie de la décision, s'appuieront plutôt sur les travaux parallèles de Shannon, qui remet un rapport aux forces armées en 1945, et publie en 1948 sa théorie mathématique de la communication, fondée sur le concept d'information. Bien que les deux hommes se soient rencontrés lors du voyage secret de Turing aux États-Unis en 1942-43, chacun ne connaissait des différents projets en cours que ce qu'il devait savoir, et ils n'ont pas échangé sur ce sujet.

C'est à partir de problèmes techniques de communication, liés à la transmission analogique (Vocoder) et numérique (MIC ou modulation par impulsions codées) de la parole, que Shannon s'intéresse à la notion de bruit. Il le considère comme une variable aléatoire et l'associe à la clé d'un code en cryptologie. Dès 1945, il remet aux Forces Armées un manuscrit, rendu public en 1957, dans lequel il précise les notions de redondance, d'équivocation, de capacité d'une voie de transmission. Il définit la quantité d'information par la fameuse formule

$$H = - \sum_{i=0}^m p_i \log_2 p_i,$$

(où les  $p_i$  sont les probabilités de sélection), qu'il justifie par l'énoncé de ses propriétés, dont l'analogie avec la formule de Boltzmann, qui lui assurera un grand succès. La base 2 choisie pour le logarithme lui permet d'établir une correspondance quasi naturelle entre le nombre de bits du message (le « bit », abréviation pour « binary digit », devient l'unité de mesure de la quantité d'information) et le nombre de questions à réponse oui-non pour déterminer un choix. Avec ses 23 théorèmes, sa *Théorie mathématique de la communication*, parue en 1948, reprend l'essentiel de ce rapport et constitue la première théorie à la fois probabiliste et algébrique de l'information, traitant du cas discret comme du cas continu. Alors que Shannon insiste sur le caractère non pertinent de la dimension sémantique du message pour sa théorie, W. Weaver, responsable d'une des divisions du NDRC, y voit au contraire, dans sa posture, un aspect fondamental de son développement à venir.

La même année paraît, en France et aux États-Unis, l'ouvrage *Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine*, de Wiener, qui propulse sur le devant de la scène un sujet d'étude à l'œuvre depuis l'article fondateur qu'il a co-signé avec Bigelow et Rosenblueth sur le même sujet en 1943. Les servomécanismes et le concept de rétroaction y offrent une représentation des phénomènes biologiques de régulation. Rappelons que parallèlement, Pitts et McCulloch élaborent un modèle connexionniste de représentation logique du cerveau, tandis qu'ingénieurs et logiciens se mobilisent autour de von Neumann pour la construction de l'EDVAC. Enfin, les conférences Macy vont réunir ces scientifiques d'horizons si différents, à la recherche d'une unification de leurs recherches et d'un discours commun. C'est dans ce cadre que la théorie de la communication va devenir théorie de l'information, dont la terminologie s'installe dès 1946 et irradie, dès 1948, aussi bien en biologie moléculaire qu'en génétique et en linguistique, renouvelant en profondeur les disciplines où il est

introduit. Le concept d'information se substitue à celui d'énergie et de matière comme concept fondamental, porteur d'une valeur heuristique d'autant plus forte qu'il n'est pas immédiatement détaché des ambiguïtés attachées au transfert de sens que suppose le passage du vocabulaire courant au vocabulaire scientifique.

Dès les années 1950, les travaux américains et soviétiques vont débattre du caractère probabiliste ou statistique des différentes définitions de l'information, avant de la resituer dans un cadre plus large, débouchant sur son axiomatisation et sur la théorie algorithmique de l'information. Aux États-Unis, les travaux de S. Kullback et R.A. Leibler proposent une réinterprétation des statistiques à partir de la notion d'information, tandis que ceux de E. T. Jaynes offrent une interprétation de la mécanique statistique comme application du principe d'entropie maximale. La théorie de l'information renforce ainsi le courant reposant sur l'interprétation subjectiviste des probabilités. En URSS, la démarche d'un A.I. Khinchin (1894-1956), dont les *Fondements mathématiques de la théorie de l'information* paraissent aux États-Unis en 1957, ou celle de A.N. Kolmogorov (1903-87), membre lui aussi de l'École mathématique fondée à Moscou dans les années 1920, est tout autre. Rejetant cette « pseudo-science bourgeoise » qu'est la cybernétique à leurs yeux, ils sont parmi les principaux mathématiciens à travailler la notion d'information dans les années 1950, qu'ils abordent au confluent de leurs recherches sur l'entropie des systèmes dynamiques et sur les algorithmes. Avec le développement des ordinateurs, ce qui, dans l'article de 1936 où Turing définit la calculabilité, était une expérience de pensée, devient l'objet de simulations véritables : la programmation constitue une véritable discipline. Dans son axiomatisation du calcul des probabilités (1933), Kolmogorov avait formalisé la manière dont on peut utiliser les probabilités des événements élémentaires sans en justifier l'existence. Il traduit la *Théorie mathématique de la communication* en russe dès 1953 et développe une véritable école soviétique de la théorie de l'information qu'il considère, bien plus qu'une technique, comme un moyen de décrire un objet mathématique de manière universelle. A la recherche d'une définition algorithmique du hasard, Kolmogorov fonde la théorie de la complexité algorithmique, qu'il définit comme la quantité d'information nécessaire pour obtenir le résultat d'un calcul selon un algorithme minimal. Une suite aléatoire peut alors être considérée comme une suite dont on ne peut obtenir les termes par aucun algorithme plus simple que celui qui consiste à en donner successivement les valeurs. Au Congrès International de Mathématiques de Nice en 1970, Kolmogorov pourra affirmer que l'approche algorithmique permet non seulement de définir l'information indépendamment des probabilités, mais aussi de fournir une nouvelle base au calcul des probabilités. Parallèlement à ces travaux de Kolmogorov, R.J. Solomonoff (1926) – qui a suivi les cours de Carnap, Fermi et Rashevsky à l'Université de Chicago en 1946 et participe à la naissance de l'Intelligence Artificielle à Dartmouth en 1956 –, G. J. Chaitin (1947), ingénieur chez IBM, et P. Martin-Löf, mathématicien suédois, parviennent, indépendamment les uns des autres, à des conceptions semblables, qui débouchent sur la théorie algorithmique de l'information ou théorie des probabilités algorithmiques. La théorie de la taille des programmes est ainsi formellement identique à la théorie de l'information, dont elle conduit l'axiomatisation.

Ainsi, ces trois interventions font-elles apparaître l'importance des interfaces entre différentes structures sociales (sciences, industrie, armée) et différents registres intellectuels (mathématiques et techniques) dans la naissance de l'ordinateur, ruinant l'idée d'une science pure qui ne se développerait qu'à partir d'interrogations de nature strictement conceptuelle. La définition même de la notion d'information, mesure d'ordre dans un ensemble de messages possibles, associe clairement l'activité de cette machine à états qu'est l'ordinateur à la possibilité d'un contrôle social également porteur d'autonomie et d'enfermement ; d'autonomie, dans la mesure où les possibilités de

traitement de l'information se trouvent considérablement accrues, et d'enfermement, dans la mesure où elles autorisent une concentration de pouvoir souvent masquée derrière les prouesses de la machine. Pour reprendre les interrogations soulevées en introduction, la possible interchangeabilité de l'humain et de la machine s'appuie sur la notion d'information, l'un et l'autre étant alors conçus comme des systèmes à états : une conception réductrice à plus d'un titre, aujourd'hui heureusement contestée de l'intérieur même du domaine des sciences cognitives, où le débat fait rage entre computationnisme et connexionnisme.

*Marie-José Durand-Richard*  
Université Paris VIII et REHSEIS