DOMINIQUE PERRIN

Les débuts de la théorie des automates

Séminaire de Philosophie et Mathématiques, 1993, fascicule 1
« Le début de la théorie des automates », , p. 1-17
<http://www.numdam.org/item?id=SPHM_1993___1_A1_0>

Les Débuts de la Théorie des Automates

Dominique Perrin

4 février 1993

Résumé

Cet article est une présentation à caractère historique faite au séminaire *Philosophie et Mathématiques* (M. Loi, P. Cartier). Il porte sur la période du début de la théorie des automates finis envisagée du point de vue de ses origines, de ses fondements et de ses applications.

Abstract

This paper is a presentation of historical nature made at the séminaire *Philosophie et Mathématiques* (M. Loi, P. Cartier). The subject is the period of the beginnings of the theory of finite automata, considered from the point of view of its origins, its basis and its applications.

Table des matières

1 Introduction

La théorie des automates finis est née d'un mouvement d'idées qui s'est produit après la dernière guerre, essentiellement aux Etats-Unis. La richesse et la diversité des idées est surprenante, surtout si l'on accepte de considérer le sujet au sens large avec des liens allant de la linguistique à l'algèbre, en passant par l'électronique et l'informatique.

Dans ce petit texte, je me suis attaché à démeler cet écheveau autant que possible, en traçant les grandes lignes des idées qui ont vu le jour progressivement jusqu'à constituer des chapitres standardisés des manuels d'aujourd'hui.

Comme toujours dans ce genre de tentative, j'ai rencontré le problème de choisir entre s'adresser à ceux qui savent déja et n'ont pas besoin d'explications, et présenter les bases du sujet à ceux qui ne le connaissent pas et n'ont aucune chance de l'apprendre en si peu de temps. Je ne prétends pas avoir trouvé la solution.

J'ai dû, par manque de temps, laisser de côté certains aspects pourtant très intéressants.

L'un est le lien des automates avec l'algèbre non-commutative. Il s'agit de l'itéraction avec la théorie algébrique des semigroupes, d'une part et, de l'autre, du développement de la théorie des automates avec mutiplicité dans un semi-anneau (sur ces aspects, on peut consulter [30] ou [13]).

Un autre est l'histoire de l'école russe dans ce domaine, qui sera mentionnée plusieurs fois ci-dessous, mais qui mériterait un détour.

J'ai de même laissé de côté la théorie des *ensembles reconnaissables de nombres*. C'est à la fois une théorie profonde avec le théorème de Cobham sur la reconnaissance simultanée dans des bases distinctes et un des aspects les plus intuitifs des automates: beaucoup des problèmes d'arithmétique distrayante portent sur la représentation des nombres dans une base fixée et sont liés à cet aspect des automates.

J'ai enfin passé sous silence (sauf une brève mention dans la section 'langage naturel') le lien des automates finis avec la théorie des grammaires dites 'context-free' ou *algébriques*. Cette théorie se trouve être à la base de l'*analyse syntaxique* qui est l'un des éléments des compilateurs, les automates eux-mêmes fournissant la base de l'*analyse lexicale* (voir [2]).

Le texte est divisé en sections qui traitent chacune d'une facette particulière du sujet. La première, d'un genre spécial, est une tentative de présentation chronologique du déroulement des opérations.

2 Chronologie

Il est difficile d'établir une chronologie exacte dans un domaine très diffus comme celui-ci, dans lequel les différents auteurs ne se connaissaient pas tous et, soit vivaient sur des continents différents, soit travaillaient dans des disciplines séparées. Par ailleurs, la seule base objective et uniforme est la date de parution des articles, qui ne correspond pas toujours bien à celle de leur écriture. On peut cependant avancer la chronologie suivante qui distingue trois périodes:

Avant guerre

1931: Kurt Gödel [18] pose les premiers fondements de la notion de calculabilité en démontrant le *Théorème d'incomplétude*.
1936: Alan Turing publie l'article [53] dans lequel il définit les *Machines de Turing*. Celles-ci contiennent en un sens la notion d'automate fini: il suffit de restreindre le concept général aux machines qui ne peuvent que lire sans écrire.
1943: Warren McCulloch et Walter Pitts publient l'article sur les réseaux de neurones [32] qui suscite huit ans plus tard le rapport de Kleene.

Les Débuts

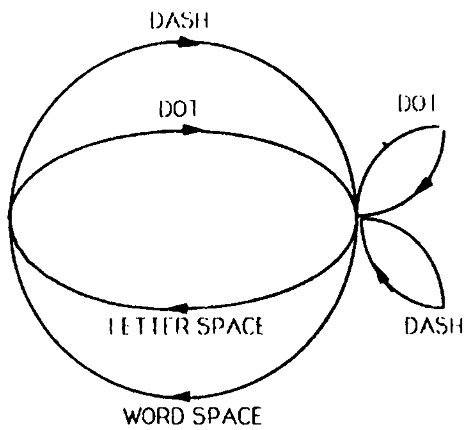

Figure 1. *Un canal de communications: le télégraphe*

1948: Claude Shannon publie l'article fondant la théorie de l'information [50]. Sa notion d'un Système Discret (“*discrete noiseless system*”) utilisée pour définir les canaux de communication, combinée avec une chaîne de Markov est en fait celle d'un automate fini. La Figure 1 reproduisant la Figure 2 de l'article:“*Graphical representation of the constraints on telegraph symbols*” est éloquente.
1948: John von Neumann introduit le terme de *théorie des automates* dans une conférence [54] dans laquelle il discute les perspectives d'une future théorie. Il dit à propos de l'article de McCulloch et Pitts:”*McCulloch and Pitts' important result is that any functioning in this sense which can be defined at all logically,*

stictly, and unambiguously in a finite number of words can also be realized by such a formal neural network".
1951: Stephen C. Kleene remet en 1951, à la RAND Corp., son mémoire sur l'article de McCulloch et Pitts qui sera publié en 1956 [28].
1954:D.A. Huffman publie un article [25] sur la *Synthèse des circuits séquentiels* qui marque les acquis de la tradition des circuits électroniques. La notion d'*état* d'un automate y apparait clairement ainsi que celle de table de transitions ('*flow table*').
1955: M.P. Schützenberger publie son premier article sur la *théorie algébrique du codage* [47]. Il introduit notemment le premier la notion de semigroupe *syntaxique* (sous le nom de *semigoupe fondamental*) qui lui permet de formuler une des définitions équivalentes de la notion de reconnaissabilité par automate fini. Son article, detiné à des mathématiciens, est rédigé en français. Il marque le premier lien entre automates et structures algébriques.
1956: Noam Chomsky publie *'Three models for the description of language'* [8] qui est la base de ce que l'on nommera plus tard la *hiérarchie de Chomsky*.
1956: l'article de E.F. Moore dans *Automata Studies* [37] introduit la notion d'états *indistinguables* et l'algorithme de minimisation qui porte aujourd'hui son nom ainsi que la preuve de *l'unicité de l'automate minimal*.
1956: Yu.T. Medvedev publie le premier article russe sur les automates [36], en annexe à la traduction en russe des *Automata Studies*. Son étude est la base du développement de la théorie en Russie.
1959: M.O. Rabin et D. Scott publient un article de base de la théorie:"*Finite automata and their decision problems*" [46]. Pour la première fois, la notion d'automate *non-déterministe* est dégagée.

Les années 60

1960: R. Büchi publie son premier article sur les automates et la théorie monadique des entiers établissant la décidabilité de la théorie faible [6] et la même année la décidabilité de la théorie forte [7] correspondant cette fois aux automates sur les mots infinis.
1965: M.P. Schützenberger publie l'article [48] dans lequel est établie la correspondance entre *automates apériodiques* et *ensembles sans étoile*.
1965: Krohn et Rhodes publient leur premier article [29] sur la théorie de la *décomposition des automates* qui montre que tout automate peut être obtenu par composition d'éléments simples.
1966: Robert McNaughton résoud le problème difficile de la déterminisation des automates sur les mots infinis [34].
1969: Michael O. Rabin prouve la décidabilité de la théorie du second ordre monadique à plusieurs successeurs. Ceci couronne en un sens, momentanément, les travaux de Büchi et McNaughton [45].

3 L'article de Kleene

La théorie des automates finis commence avec l'article de S.C. Kleene [28] paru en 1956 dans un recueil édité par C.Shannon et J.McCarthy intitulé *Automata Studies* et publié par Princeton University Press.

Dans cet article tant de fois cité, Kleene démontre le premier résultat de cette théorie. C'est à la fois le premier dans l'ordre chronologique et aussi dans l'ordre d'importance. Il s'agit d'une sorte de théorème de représentation qui établit l'équivalence entre deux modes de définition du même objet. Ces objets sont ce que Kleene appelle les *événements réguliers*, aujourd'hui appelés souvent *langages* plutot qu'événements et qualifiés de *rationnels* plutôt que de réguliers. Le terme d'événement renvoie bien sûr à la terminologie du calcul des probabilités mais aussi certainement au point de vue de départ de cette théorie qui s'adresse à la *description* de phénomènes plutôt, comme maintenant, qu'à la *spécification* de propriétés formelles.

On connait la genèse de l'article de Kleene. L'histoire commence à la RAND Corporation qui demande à Kleene d'analyser un article de W. McCulloch et W. Pitts paru en 1943 dans une revue de biophysique mathématique [32]. Kleene effectue le travail durant l'été 1951 et rédige un mémoire de 101 pages pour la RAND Corporation qui reprend de fond en comble le travail de McCulloch et Pitts au point d'en abandonner la lecture à partir d'un certain point:"*(..)This seems to be a counterexample to the formula next after (9) on p. 126 of McCulloch-Pitts [1943], the proof of which we did not follow; (...)(Their 0 seems to be our 1.) This apparent counterexample discouraged us from further attempts to decipher Part III of McCulloch-Pitts[1943].*".

Le modèle d'automate de McCulloch et Pitts est constitué de *neurones* reliés par des *axones*. Chaque neurone peut être *actif* ('firing') ou au repos. L'état d'un neurone à un instant donné dépend de son *seuil* ('threshold') qui donne le nombre de neurones connectés qui doivent être actifs à l'instant précédent pour que lui-même le soit maintenant. Ce modèle aujourd'hui oublié (sauf peut-être dans les sciences cognitives) est assez difficile à manoeuvrer. Le problème principal est celui de la *synchronisation* des différents éléments.

On voit représentés sur la Figure 2 deux schémas de construction de réseaux. L'un pour réaliser l'union des événements représentés eux-mêmes par les réseaux E et F, l'autre de façon analogue pour le produit EF. Les neurones $N_1, \ldots, N_k$ représentent l'entrée commune des deux réseaux E et F. Le neurone P, de seuil égal à 1, est dans les deux cas le neurone de sortie. Dans le cas du produit, le réseau E se voit ajouter un neurone d'entrée supplémentaire N_{k+1} pour marquer le moment où F a terminé (Kleene lit à l'envers et, dans le produit EF, c'est F qui se produit avant E. Pour que le dispositif fonctionne, il faut une normalisation de E qui constitue un lemme technique sur les expressions rationnelles qui a, semble-t-il, été oublié puis retrouvé indépendamment lors des travaux ultérieurs sur le problème de la *hauteur d'étoile*.

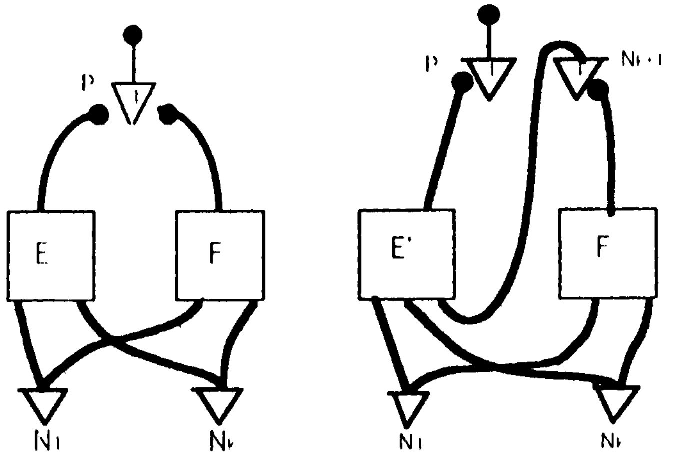

Figure 2. *Les réseaux pour l'union de E et F et pour le produit EF*

4 Circuits et automates

L'une des sources très importantes d'inspiration dans la genèse de la théorie des automates a été le domaine des circuits électroniques ou *'switching theory'*. Ce domaine se situe lui-même en descendant de la théorie des circuits électriques du XIXème de Kirchoff, Heaviside (le *calcul fonctionnel*) ou Kennelly (la transformation delta-étoile). On pourra consulter à ce sujet le travail historique de V. Belevitch [4].

Le mécanisme qui fait intervenir les automates est l'apparition de l'évolution temporelle des entrées et sorties d'un circuit logique, conduisant de ce que l'on nomme aujourd'hui *circuits combinatoires* aux *circuits séquentiels*. Les circuits combinatoires constituent, eux, une simple réalisation matérielle du calcul des propositions et on retrouve, à leur occasion, le nom de C. Shannon puisque son premier travail publié est un article sur le lien entre circuits et algèbre de Boole [49].

L'étude du comportement des circuits sous une *suite* de signaux d'entrées nécessite un formalisme différent qui fait intervenir, soit le temps de façon explicite, comme dans la théorie du filtrage, soit la concaténation des suites et leur itération, comme dans la théorie des automates. Pour l'automate lui-même, il y a un choix possible pour le représenter, soit comme un réseau de portes logiques et de délais, soit, de façon plus abstraite, par un diagramme d'états ou une fonction de transition. Il parait évident maintenant qu'il est beaucoup plus facile de manipuler un automate sous forme abstraite, quitte à revenir à une forme concrète plus tard. Ceci n'était pas évident au début et a même échappé à Kleene qui aurait eu moins de mal dans ses constructions si elles ne portaient pas sur des réseaux avec des problèmes compliqués de synchronisation (voir plus haut).

Le premier article faisant explicitement usage de la notion d'automate et, en particulier, de celle d'*état* pour décrire les circuits séquentiels est l'article de Huffman en 1954 [25]. Comme dans la problématique des automates en général, l'accent est mis sur la possibilité de *spécifier* le comportement d'un circuit (valeurs des sorties en fonction des entrées au cours du temps) et de calculer un circuit qui satisfait ces conditions.

Dans un article souvent cité mais difficile à trouver, David Muller [41] introduit, apparament sans connaître le travail de Büchi, la notion d'automate reconnaissant des suites infinies de symboles. Il donne un exemple très intéressant dans lequel cette situation se rencontre en considérant le comportement d'un circuit très simple (voir Figure 3). Il s'agit de deux circuits identiques et indépendants qui sont des inverseurs dont le fonctionnement est asynchrone , avec la règle que chacun d'entre eux effectue l'inversion au bout d'un intervalle de temps fini.

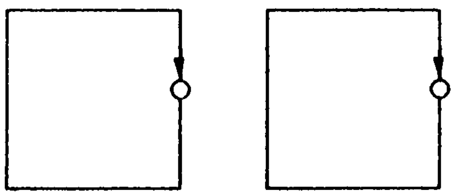

Figure 3. *Une paire de circuits oscillants*

Le comportement de tels automates doit, pour être décrit de façon déterministe, utiliser la *condition de Muller* qui spécifie l'ensemble des états infiniment répétés au lieu de simplement préciser, comme la *condition de Büchi*, l'ensemble des états par lequel l'automate est contraint de repasser une infinité de fois.

La forme moderne de ces circuits utilise la technologie des circuits intégrés et la possibilité de réaliser des automates de cette façon fait intervenir une architecture particulière (les "*Programmable Logical Arrays (PLA)*").

5 La filière logique

C'est probablement à travers le travail de Kleene que les logiciens se sont intéressés très tot à la théorie des automates. Ce dernier était déja un spécialiste connu des fonctions récursives et de la calculabilité, théories dans lesquelles il a apporté des contributions essentielles. Il a en fait cessé de s'interesser aux automates finis aussitôt son article fondateur [28] paru, pour retourner aux fonctions récursives.

Rapidement, un autre aspect a été envisagé, notamment par Alonzo Church [10]: il s'agit d'étudier des fragments décidables de la théorie des entiers, prouvée indécidable par K.Gödel en 1931 [18]. Une façon de voir le lien entre cette question et les automates consiste à considérer les automates finis comme des machines de Turing particulières. Puisque les machines de Turing définissent les ensembles récursifs, les automates finis doivent correspondre à une classe particulière d'ensembles d'entiers. De même, les propriétés définissables par automate fini doivent correspondre à un usage restreint de la notion de *fonction récursive*, équivalente à celle de machine de Turing. Cet aspect suscite l'interet de nombreux chercheurs et, en particulier de R. Büchi, C. Elgot [15], J.B. Wright et, en URSS, de B. Trahtenbrot [52].

Le résultat précis est, semble-t-il, du à Richard Büchi [6, 7]: les ensembles d'entiers spécifiables par automate fini sont exactement ceux que l'on peut définir dans la *logique monadique du second ordre*. Cette logique, que Büchi baptise *sequential calculus* utilise des variables du second ordre, mais restreintes à des parties (et non à des relations) et la fonction successeur (mais non l'addition ou la multiplication). Il s'agit en fait d'un langage alternatif à celui des expressions rationnelles dont Kleene avait prouvé l'équivalence avec les automates finis. Ce résultat a pour conséquence la preuve de la décidabilité du fragment correspondant de l'arithmétique, constituant la réponse à un problème soulevé par Tarski.

Cet aspect de la théorie des automates finis a eu des prolongements par la suite dans au moins deux directions.

L'une est l'extension de la théorie des automates au domaine des *mots infinis* et, plus tard, avec la théorie de Rabin, aux *arbres infinis* correspondant cette fois à la logique monadique de plusieurs successeurs. La théorie classique des automates correspond en effet, vue sous cet angle, à la *théorie faible* dans laquelle les variables d'ensemble sont interprétées sur des ensembles *finis*, et l'interprétation générale des variables avec des ensembles infinis d'entiers conduit à considérer des mots infinis. Ainsi la formule

$$\exists x p(x)$$

correspond à l'ensemble des mots sur l'alphabet $\{0, 1\}$ comportant au moins une occurrence de 1. Curieusement, les mots infinis apparaissent déja dans l'article original de Kleene [28]. Celui-ci, ayant en effet en tête un modèle de la mémoire, situe l'instant 0 (le présent) à la fin d'un mot infini à gauche qui représente les événements survenus dans le passé. Mais comme il n'introduit pas de condition sur ce qui se passe à l'infini, le modèle ne lui permet pas de spécifier l'état initial dès que l'automat a une mémoire non bornée du passé (au contraire du cas des *événements définis* correspondant aux automates sans cycles). Kleene démontre même un théorème d'impossibilité (Théorème 6 en Appendice de son article) selon lequel, avec des mots infinis, les automates ne permettent pas de définir autre chose que des événements définis. Vu avec des yeux contemporains, ceci se reformule en disant que de tels automates ne peuvent reconnaitre que des ouverts, ce qui n'est pas surprenant.

Le résultat majeur prouvé quelques années plus tard est dû à McNaughton [34]. Il s'agit d'un théorème de déterminisation des automates reconnaissant des mots infinis qui clôt une direction de recherche ouverte par David Muller [41]. Ce dernier, qui a donné son nom aux ***automates de Muller*** avait introduit l'idée de reconnaissance de mots infinis à propos de ***circuits oscillants*** (voir plus haut, Section 4).

L'autre direction est l'étude, initiée par McNaughton [33], de la théorie du premier ordre correspondant au calcul séquentiel de Büchi lorsqu'on dispose, en plus, d'un ensemble fixe de prédicats unaires. Cette théorie conduit à celle des ***automates apériodiques*** exposée dans la monographie de McNaughton et Papert [35]. Le théorème principal dans ce domaine est dû à M.P Schützenberger [48]. Il montre que , comme la classe de tous les automates finis, celle des automates apériodiques a un pouvoir d'expression équivalent à un formalisme simple incluant les opérations booléennes et la concaténation mais plus l'itération. Cette théorie sera systématisée plus tard dans le livre d'Eilenberg avec la ***théorie des variétés*** qui définit des variétés au sens de Birkoff dont les automates apériodiques sont un cas particulier. On peut consulter à ce sujet [14] ou [44]. Du point de vue des applications, la logique de McNaughton a pour héritier la ***logique temporelle*** qui permet d'exprimer facilement les propriétés des sytèmes concurrents comme , par exemple, les circuits oscillants de David Muller de la Figure 3.

6 Langage naturel

Dans l'article fondateur de Shannon [50], on trouve, comme nous l'avons vu, un modèle très voisin des automates finis, qui est directement issu des chaînes de Markov. Ce modèle est appliqué en particulier à ce que Shannon appelle des ***approximations*** du langage naturel. Il s'agit de chaînes de Markov d'ordre croissant réalisant un automate local pour la structure de la langue au niveau lexical (lettre par lettre ou mot par mot). Ainsi, en prenant successivement au hasard des diagrammes chevauchants dans un texte en anglais, on obtient l'exemple saisissant ([50] page 13):

ON IE ANTSOUTINYS ARE T INCTORE ST BE S DEAMY ACHIN D ILONASIVE TUCOOWE AT TEASONARE FUSO TIZIN ANDY TOBE SEACE CTISBE

L'idée d'utiliser des automates pour décrire la langue naturelle est reprise un peu plus tard par Chomsky [8]. Il donne des exemples comme celui de la Figure 4 extraite de 'Syntactic Stuctures' ([9] p. 19). En fait, Chomsky n'introduit les automates que pour les écarter assez rapidement au profit du niveau supérieur de ce que l'on nomme aujourd'hui la ***hiérarchie de Chomsky***: automates finis au rez-de-chaussée, automates à pile et grammaires au premier étage, machines

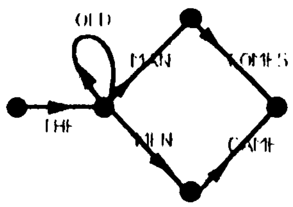

Figure 4. *Un automate pour des phrases simples*

de Turing au second. Les arguments employés par Chomsky pour écarter les automates finis comme modèle adéquat des langues naturelles sont fondés sur la présence de ***structures parenthésées*** provenant de constructions grammaticales comme les propositions conditionnelles:

$$\text{si } S_1 \text{ alors } S_2$$

analogues à celles des langages de programmation et qui permettent, en principe, une imbrication non bornée.

Le fait que l'anglais ne soit pas un langage rationnel (*"English is not a finite state language"* est énoncé en [9] p. 21 avec une *"indication of the proof"* page 23) semble aujourd'hui être, à la fois, non prouvable et en balance avec le fait que, de toutes façons, une description complète de la syntaxe de l'anglais (ou du français) est aussi difficile à réaliser sous forme d'automate fini que de grammaire. Les automates ayant par contre l'avantage sur les grammaires de se prêter à un grand nombre de manipulations automatisables, certains, comme Maurice Gross, pensent que ce sont finalement les automates finis qui fournissent l'essentiel de la description (voir [20]).

7 La théorie de l'information

On a déja vu à plusieurs reprises le rôle très important joué par la théorie de l'information, et Shannon lui-même, dans la genèse des idées de la théorie des automates.

Un des aspects qui relie les deux sujets est la notion de ***codage*** qui joue un rôle important dans les deux cas. En effet, un des objectifs de la théorie de l'information est de décrire les mécanismes de ***communication*** et de transmission de l'information que les progrès techniques en télécommunications venaient de développer de façon spectaculaire.

La même préoccupation apparait bien entendu dans la théorie des automates puisque les automates munis d'une ***sortie***, en plus de l'entrée, définissent des fonctions dites de ***transduction*** ou de codage. Cet aspect se rencontre dans la problématique des circuits avec les *'information lossless machines'* de Huffman [26]. On le retrouve dans la théorie du *codage à longueur variable* qui s'est développée à cette période en même temps que celle des *codes correcteurs d'erreurs*, toute deux descendantes de la théorie de Shannon.

Huffman publie en 1951 l'algorithme qui porte aujourd'hui son nom [24], et qui est un complément apporté au premier théorème de Shannon sur la possibilité d'atteindre la capacité d'un canal sans bruit. Peu après les premiers articles de Schützenberger sur le codage, déja mentionnés, parait celui de E. N. Gilbert et E. F. Moore [16] qui restera sans beaucoup de postérité en dépit de son originalité. les développements ultérieurs sont décrits dans mon livre avec Jean Berstel [5].

La théorie de l'information elle-même a subi des avatars curieux. Son succès aux Etats-Unis dans le public s'est, semble-t-il, accompagné d'un désintérêt de la part des universitaires. Et c'est par contre la publication du livre de A. Khinchine [27] qui a répandu les idées de Shannon dans le milieu mathématique russe. L'étape suivante s'est précisément produite de ce côté puique Kolmogorov a incorporé la notion d'entropie de Shannon à la théorie ergodique en montrant qu'elle fournissait un nouvel invariant permettant par exemple de distinguer le 2-shift du 3-shift.

Dans la mathématisation des idées de Shannon par Kolmogorov avec les travaux ultérieurs de nombreux mathématiciens, les idées de départ ne se sont pas tout à fait perdues puisque les problèmes soulevés par Kolmogorov se sont élargi ensuite à des domaines comme celui de la dynamique symbolique dont il est question plus bas, avec des applications utiles au codage, et qui semblent donner tort à Paul Halmos qui dit dans l'introduction de [21]: *"Most extant expositions of information theory are designed to make the subject palatable to non-mathematicians, with the result that they are full of words like "source" and "alphabet". Such words are presumed to be an aid for intuition; for the serious student, however, who is anxious to get at the root of the matter, they are more likely to be confusing than helpful."*

8 La dynamique symbolique

De façon à peu près indépendante du développement de la théorie des automates dont il est question ici, s'est développé une théorie qui apparait aujourd'hui très voisine, sous le nom de *dynamique symbolique*. Il s'agit, selon son fondateur Marston Morse d'une *"algebra and geometry of recurrence"*. Les suites de symboles inetrvenant ici sont celles que l'on obtient en codant des courbes sur une surface par la suite des éléments d'une partition de la surface rencontrés en parcourant la courbe (les partitions de Markov) . Le premier article de M. Morse [39] remonte à 1921. Par la suite, Morse publiera en collaboration avec G. Hedlund, un article de synthèse en deux parties [38] et le domaine se développera comme une branche particulière de la théorie des systèmes dynamiques et de la théorie ergodique, rejoignant en cela la filiation des idées de la théorie de l'information et, en particulier la notion d'*entropie* (voir plus haut). Les liens avec la théorie des automates sont nombreux et on peut constituer une sorte de dictionnaire de traduction des termes utilisés des deux côtés. Ainsi un automate local devient un *système de type fini*, et un automate fini un *système sofique* (le mot sofique, dérivé du mot hebreu signifiant fini est introduit par Benjamin Weiss [55]).

Parmi les curiosités dûes au hasard qui a accompagné le développement de ces idées, il faut citer un très intéressant texte d'Andrew Gleason qui na été que récemment publié [17].Il s'agit de notes d'un cours donné par Gleason à Princeton en 1960 sur la dynamique symbolique (apparaissant sous encore un autre nom: '*shift- register counting matrices*') et dont les résultats se recoupent avec ceux de l'article de Hedlund [22] paru plus tard. En fait, les méthodes utilisées par Gleason se rapprochent de celles de la théorie algébrique des automates en introduisant notamment l'*idéal minimal* d'un semigroupe fini, comme ceci est fait sytématiquement dans le traitement des automates utilisant des semigroupes (voir [30] ou [44]).

Le problème central de la dynamique symbolique est devenu celui de la classification, à un codage près, des systèmes de type fini. Ceci raproche cette théorie de la théorie de l'information et du codage de Shannon et de son prolongement dans la classification des systèmes dynamiques. Des liens très intéressants avec les problèmes pratiques de codage ont été mis à jour (voir [1] ou [3])

9 Les 'catchwords'

Il y a dans toutes les théories à succès des mots magiques. Les débuts des automates utilisent des mots dont certains sont devenus franchement comiques tandis que d'autres ont gardé une certaine poésie. L'ensemble de cette période des débuts de l'informatique a introduit dans le domaine des systèmes formels des termes empruntés aux domaines du comportement humain ou du monde vivant. Dans ce florilège, je mentionne les jolis mots suivants:

self-reproduction

Du point de vue formel, l'idée est liée à celle de récursivité devenue familière à tous les étudiants d'informatique aujourd'hui qui ne s'étonnent plus de voir la même inconnue figurer des deux côtés d'un symbole de définition. Du point de vue humain, le terme fait appel à une situation qui continue de susciter l'interêt. Cette dualité a été abondamment utilisée par von Neumann qui a fait de la capacité *auto-reproductrice* des automates un élément central de son argumentation. En fait, ceci parait aujourd'hui une banalité des fonctions récursives sans rapport direct avec les automates, sauf si on insiste pour simuler une machine de Turing par un automate cellulaire.

gedanken experiments

Le terme est, semble-t-il, dû à E.F. Moore et il apparait dans son article [37] publié dans le recueil historique 'Automata Studies'.Pour le citer:"*This paper is concerned with finite automata from experimental point of view. This does not mean that it reports the results of any experimentation on actual physical models, but rather it is concerned with what kinds of conclusions about the internal conditions of a finite machine it is posible to draw from external experiments, the word "gedanken-experiments" has been borrowed from the physicists for the title*". Pas de quoi réclamer un financement pour des installations coûteuses. Le terme semble avoir pourtant fait rêver. Peut-être est cet aspect d'expériences imaginaires qui a attiré bon nombre de chercheurs vers les automates et, notamment, non des moindres J. H. Conway. Celui-ci publiera en 1971 un livre très original et profond sur les automates [12] qui passera à peu près entiérement inaperçu.

Hallucinations

Voici un terme moins connu que les précédents qui figure dans le papier original de Kleene [28]. Il désigne de façon peu claire les états d'un automate qui pouraient être atteints sans que *l'événement* correspondant se soit produit. Considéré comme une catastrophe.

10 Les sources

Je me suis appuyé pour préparer ce document sur le très beau travail de Jean Mosconi [40] que je tiens à remercier pour son aide. Les autres sources disponibles sur l'histoire de la théorie des automates sont peu nombreuses. Je citerai le 'survey' de McNaughton [33], l'article de Robert Constable [11] qui figure dans un ouvrage d'hommage à Kleene, celui de Sheila Greibach [19], et l'article écrit en commun avec mon ami Jacques Sakarovitch, jamais vraiment publié [43].

Les manuels récents traitant de la théorie des automates sont orientés par les buts poursuivis: On a d'une part le très classique manuel de Hopcroft et Ullman [23] pour étudiants d'informatique. Dans le même registre, le manuel de base de compilation de Aho, Sethi et Ullman [2] donne la vision des applications aux algorithmes de traitement de textes. A l'opposé, le traité en deux volumes d'Eilenberg [13], [14] représente la version la plus mathématisée des automates. Le récent *Handbook of Theoretical Computer Science* [31] contient deux articles sur les automates finis [42] [51].

Références

[1] Roy L. Adler, D. Coppersmith, and M. Hassner. Algorithms for sliding block codes. *IEEE Trans. Inform. Theory*, IT-29:5-22, 1983.

[2] Alfred V. Aho, Ravi Sethi, and Jeffrey D. Ullman. *Compilers, Principles, Techniques and Tools*. Addison Wesley, 1986.

[3] Marie-Pierre Béal. *Codage Symbolique*. Masson, 1993.

[4] V. Belevitch. Summary of the history of circuit theory. *Proc. IRE*, 50:848–855, 1962.

[5] Jean Berstel and Dominique Perrin. *Theory of Codes*. Academic Press, 1985.

[6] Richard Büchi. Weak second order arithmetic and finite automata. *Zeit. Math. Logik Grund.*, 6:66–92, 1960.

[7] Richard Büchi. On a decision method in restricted second order arithmetic. In *Proc. 1960 Int. Congress on Logic, Methodology and Philosophy of Science*, pages 1–11. Stanford University press, 1962.

[8] Noam Chomsky. Three models for the description of language. *IRE Trans. Inf. Th.*, IT-2, 1956. (Proc. of the symposium on Information Theory, Sept. 1956).

[9] Noam Chomsky. *Syntactic Structures*. Mouton, 1957.

[10] Alonzo Church. Application of recursive arithmetic to the problem of circuit synthesis. In *Summaries of talks presented at the Summer Institute for Symbolic Logic*, pages 3–50. Cornell University, 1957.

[11] Robert L. Constable. The role of finite automata in the development of modern computing theory. In K.Kunen J.Barwise, H.J.Keisler, editor, *The Kleene symposium*, pages 61–83. North Holland, 1980.

[12] John H. Conway. *Regular Algebra and Finite Machines*. Chapman and Hall, 1971.

[13] Samuel Eilenberg. *Automata, Languages and Machines*, volume A. Academic Press, 1974.

[14] Samuel Eilenberg. *Automata, Languages and Machines*, volume B. Academic Press, 1976.

[15] Calvin C. Elgot. Decision problems of finite automata design and related arithmetics. *Trans. Amer. Math. Soc.*, pages 21–51, 1961.

[16] E. N. Gilbert and E. F. Moore. Variable length binary encodings. *Bell Systems Tech. J.*, 38:933–967, 1959.

[17] Andrew Gleason. Semigroups of shift register matrices. *Mathematical Systems Theory*, 25:253–267, 1992. (reproduction des notes d'un cours donné à Princeton en 1960).

[18] Kurt Gödel. Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandte Systeme I. *Monatshefte für Mathematik und Physik*, XXXVIII:173–198, 1931.

[19] Sheila Greibach. Formal languages: origins and directions. *Ann. Hist. Comput.*, 3, 1981.

[20] Maurice Gross and Dominique Perrin. *Electronic Dictionnaries and Automata in Computational Linguistics*. Lecture Notes in Computer Science, 377. Springer, 1989.

[21] Paul Halmos. Entropy in ergodic theory. In *Selecta Expository Writing*. Springer, 1983. (reproduction de notes de cours à l'Université de Chicago, 1959).

[22] G. Hedlund. Endomorphisms and automorphisms of the shift dynamical system. *Math. Syst. Theory*, 3:320–375, 1969.

[23] John E. Hopcroft and Jeffrey D. Ullman. *Introduction to Automata Theory, Languages and Computation*. Addison Wesley, 1979.

[24] D. A. Huffman. A method for the construction of minimum redundancy codes. *Proc. IRE*, 40:1098–1101, 1951.

[25] D. A .Huffman. The synthesis of sequential switching circuits. *Journal of the Franklin Institute*, 257:161–190, 1954. repris dans Sequential Machines, E.F.Moore ed.,Addison Wesley,1964.

[26] David A Huffman. Canonical forms for information-lossless finite-state logical machines. In E. F. Moore, editor, *Sequential Machines, Selected Papers*. Addison Wesley, 1964.

[27] A. Ya. Khinchine. *Mathematical Foundations of Information Theory*. Dover, 1957.

[28] Stephen C. Kleene. Representation of events in nerve nets and finite automata. In C.E.Shannon and J.McCarthy, editors, *Automata Studies*, pages 3–42. Princeton University Press, 1956.

[29] Kenneth Krohn and John Rhodes. Algebraic theory of machines, I. Prime decomposition theorem for finite semigroups and machines. *Trans. Amer. Math. Soc.*, 116:450–464, 1965.

[30] Gérard Lallement. *Semigroups and Combinatorial Applications*. Wiley, 1979.

[31] J. Van Leeuwen, editor. *Handbook of Theoretical Computer Science*. Elsevier, 1990.

[32] Warren McCulloch and Walter Pitts. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophisics*, 5:115–133, 1943.

[33] Robert McNaughton. The theory of automata, a survey. In F. L. Alt, editor, *Advances in Computers*, volume 2, pages 379–416. Academic Press, 1961.

[34] Robert McNaughton. testing and generating infinite sequences by a finite automaton. *Information and Control*, 9:521–530, 1966.

[35] Robert McNaughton and Seymour Papert. *Counter-Free Automata*. MIT Press, 1971.

[36] Yu. T. Medvedev. Sur la classe des événements représentables dans un automate fini(en russe). In *Avtomaty*, pages 385–401, 1956. trad.angl. in Sequential machines, E.F.Moore ed.,Addison Wesley,1964.

[37] E.F. Moore. Gedanken experiments on sequential machines. In C. E. Shannon and J. McCarthy, editors, *Automata Studies*, pages 129–156. Princeton University Press, 1956.

[38] M. Morse and G. Hedlund. Symbolic dynamics. *Amer. J. of Math.*, 3:286–303, 1936.

[39] Marston Morse. Recurrent geodesics on a surface of negative curvature. *Trans. Amer. Math. Soc.*, 22:84–110, 1921.

[40] Jean Mosconi. *La constitution de la théorie des automates*. Atelier National de Reproduction des Thèses, Université de Lille III, 9 rue A. Angellier 59046 Lille, 1989. 2 vol.

[41] David E. Muller. Infinite sequences and finite machines. In *Switching circuit theory and logical design*, pages 3–16. IEEE, 1963.

[42] Dominique Perrin. Finite automata. In Jan van Leeuwen, editor, *Handbook of Theoretical Computer Science*, volume B, chapter 1, pages 1–57. Elsevier, 1990.

[43] Dominique Perrin and Jacques Sakarovitch. Automates finis. In *Journées scientifiques de l'UAP*, 1989.

[44] Jean Eric Pin. *Variétés de langages Formels*. Masson, 1984. (*Varieties of Formal languages*, North Oxford Plenum, 1986).

[45] Michael O. Rabin. Decidability of second-order structures and automata on infinite trees. *Trans. Amer. Math. Soc.*, 141:1–35, 1969.

[46] Michael O. Rabin and Dana Scott. Finite automata and their decision problems. *IBM journal of Research and developpement*, 3:114–125, 1959. repris dans Sequential Machines, E.F.Moore ed.,Addison Wesley,1964.

[47] M. P. Schützenberger. Une théorie algébrique du codage. In *Séminaire Dubreil-Pisot*, 1955. exposé n!15.

[48] M.P. Schützenberger. On monoids having only trivial subgroups. *Information and Control*, 8:190–194, 1965.

[49] C.E. Shannon. A symbolic analysis of relay and switching circuits. *Trans. Amer. Inst. Electrical Engineers*, 57:713–723, 1938.

[50] Claude E. Shannon. A mathematical theory of communication. *Bell Systems Tech. Journal*, XXVII:379–423, 623–656, 1948. (reproduit dans The mathematical Theory of Communication, C.E. Shannon et W. Weaver, The University of Illinois Press, 1949).

[51] Wolfgang Thomas. Automata on infinite objects. In Jan van Leeuwen, editor, *Handbook of Theoretical Computer Science*, volume B, chapter 4. North Holland, 1990.

[52] Boris A. Trahtenbrot. La synthèse des réseaux logiques dont les opérateurs sont décrits en termes de calcul des prédicats à une place (en russe). *Doklady Acad. Nauk. SSSR*, 118:646–649, 1958.

[53] Alan M. Turing. On computable numbers with an application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Math. Soc.*, 42:230–265, 1936.

[54] John von Neumann. The general and logical theory of automata. In L.A.Jeffress, editor, *the Hixon Symposium (Sept. 1948, pasadena)*. Wiley, 1951. (reproduit dans 'Collected Works', Volume V, Pergamon Press, 1961).

[55] Benjamin Weiss. Subshifts of finite type and sofic systems. *Monats. Math.*, 77:462–474, 1973.