



HAL
open science

L'impossible constitution d'une théorie générale des machines ? La cybernétique dans la France des années 1950

Ronan Le Roux

► **To cite this version:**

Ronan Le Roux. L'impossible constitution d'une théorie générale des machines ? La cybernétique dans la France des années 1950. *Revue de Synthèse*, 2009, 130 (1), pp.5-36. 10.1007/s11873-009-0070-y . hal-00478459

HAL Id: hal-00478459

<https://hal.science/hal-00478459>

Submitted on 30 Apr 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'IMPOSSIBLE CONSTITUTION D'UNE THÉORIE GÉNÉRALE DES MACHINES ?

La cybernétique dans la France des années 1950

Ronan Le ROUX*

RÉSUMÉ : On présente trois projets de théories des machines : la « mécanologie » de l'architecte Jacques Lafitte (1932), inspirée de l'évolution biologique ; l'« Analyse mécanique » de Louis Couffignal, spécialiste des machines à calculer (1938), qui préfigure l'analyse fonctionnelle ; et la théorie algébrique des machines du mathématicien Jacques Riguet (début des années 1950). À cette période, les trois hommes sont membres du Cercle d'études cybernétiques. On s'intéresse au dialogue des projets, aux axes d'unification et de divergence, aux styles, aux stratégies et postulats de ces trois candidats à la généralisation convergeant vers la référence constituée par la cybernétique.

MOTS-CLÉS : Ashby, Couffignal, cybernétique, Lafitte, Riguet.

THE IMPOSSIBLE STRUCTURING OF A GENERAL THEORY OF MACHINES? Cybernetics in France in the 1950's

ABSTRACT: Three projects on the theories of machines are presented: "mecnology" of the architect Jacques Laffite (1932) inspired by biological evolution; "mechanical analysis" of Louis Couffignal, a specialist in computing machines (1938), which prefigures functional analysis, and the algebraic theory of machines by the mathematician Jacques Riguet (beginning of the 1950's). During those years, the three men are members of the Circle of Cybernetic Studies. The article focuses on the dialogue between projects, the axes of unification and divergence, and the styles, strategies and postulates of these three candidates, for generalization converging toward the reference constituted by cybernetics.

KEYWORDS: Ashby, Couffignal, cybernetics, Lafitte, Riguet.

* Ronan Le Roux, né en 1979, est doctorant à l'École des hautes études en sciences sociales, au Centre Maurice-Halbwachs (UMR 8097). Sa thèse porte sur l'histoire de la cybernétique en France (1948-1970). Il est l'auteur de travaux concernant cette histoire et les théoriciens français des techniques (Gilbert Simondon et Pierre Ducassé notamment). Il vient de publier « Lévi-Strauss, une réception paradoxale de la cybernétique » (*L'Homme*, n° 189, 2009).

Adresse : Centre Maurice-Halbwachs, École normale supérieure, Campus Jourdan, 48, boulevard Jourdan, F-75014 Paris.

Courrier électronique : ronan.le.roux@gmail.com

**DIE UNMÖGLICHE ERSTELLUNG EINER ALLGEMEINEN MASCHINENTHEORIE ?
Die Kybernetik in Frankreich in den 1950er Jahren**

ZUSAMMENFASSUNG: Der Aufsatz präsentiert drei Projekte für Maschinentheorien: die durch biologische Evolution inspirierte „Mechanologie“ des Architekten Jacques Lafitte (1932), die die funktionelle Analyse vorwegnehmende „mechanische Analyse“ des Rechenmaschinen-Spezialisten Louis Couffignal (1938), und die algebraische Maschinentheorie des Mathematikers Jacques Riguet (seit den 1950er Jahren). In jenen Jahren waren die drei Männer Mitglieder des „Kreises kybernetischer Studien“. Der Aufsatz untersucht den Dialog der Projekte im Hinblick auf Vereinheitlichung und Divergenz, auf Stile, Strategien und Postulate der drei Kandidaten, deren Verallgemeinerung auf den Referenzpunkt der Kybernetik hin konvergiert.

STICHWÖRTER: Ashby, Couffignal, Kybernetik, Lafitte, Riguet.

رونان لورو استحالة تكوين نظريه عامة للآلات ؟ علم التحكم في الخمسينات في فرنسا

ملخص: سنقترح ثلاثة مشاريع تخص نظرية الآلات: "علم الميكانيك" للمهندس جاك لافيت (1932)، الذي استلهمه من فكر التطور البيولوجي، "النظرية الجبرية" للويس كوفينال المختص بالآلات الحاسوبية (1938) والذي بصور التحليل الوظيفي، والنظرية الجبرية لآلات علماء الرياضيات لجاك ريغات (مطلع الخمسينات). في هذه السنوات، كان كل واحد من هؤلاء الثلاث عضواً في حلقة دراسات علم التحكم. سوف نهتم بحوار هاته المشاريع الثلاث، بمحاور التماثل والتباين، بالأساليب، باستراتيجيات ومبادئ هؤلاء الثلاث الذين تقدموا بتعميم أدى إلى مرجعية كونها علم التحكم.

الكلمات المفتاحية: أشبي، كوفينال، لافيت، ريغات.

機械の一般的理論の構築は不可能か？

1950年代のフランスにおけるサイバネティクス

ロナン・ルルー

要約：ここでは、機械の理論に関する3つの構想を紹介したい。まずはじめに、生物学的進化論から着想を得た、建築家ジャック・ラフィット（1932）の「メカノロジー（機械学）」について、次に、計算機の専門家であり、機能分析を予示したルイ・クフィニャル（1938）の「機械分析」、そして、数学者ジャック・リゲ（1950年代初頭）の機械代数理論。この時代では、この3者はサイバネティクス研究サークルのメンバーであった。我々は、彼らの研究に関する話し合い、意見の一致、または不一致となった点、スタイル、策略、公準について、そしてこの三者の考えを概括するとサイバネティクスへ一致していくということについて考えたいと思う。

キーワード：アシュバイ、クフィニャル、ラフィット、リゲ

Les projets de théories des machines tendent à se développer historiquement selon différentes options philosophiques et méthodologiques, parmi lesquelles importent particulièrement des traditions de pensée de type naturaliste ou évolutionniste, ainsi que de type combinatoire. On peut étudier ces projets de différentes façons. On pourrait essayer de dresser un tableau pour les classer en fonction des options présidant à leur construction. On peut aussi procéder à une coupe synchronique pour analyser leur dispersion à une époque donnée. Enfin, une monographie diachronique peut relater la genèse et l'évolution de chaque projet. Chacune de ces approches s'attache à un aspect de son objet, et en laisse d'autres de côté. Dans cet article, nous allons essayer de décrire un phénomène de convergence de projets, dont les approches monographiques, synchroniques ou classificatoires ne peuvent rendre compte en raison même de leur forme.

On considère trois projets de théories des machines : la « mécanologie » de l'architecte Jacques Lafitte (1932), inspirée de l'évolution biologique ; l'« analyse mécanique » de Louis Couffignal, spécialiste des machines à calculer (1938), qui préfigure l'analyse fonctionnelle ; et la théorie algébrique des machines du mathématicien Jacques Riguet (début des années 1950). Tous trois visent indépendamment une très grande généralité de leur objet par des moyens très différents. Dans les années 1950, la cybernétique peut apparaître comme le vecteur d'intégration maximale de traditions de pensée naturalistes et formalistes. Lafitte, Couffignal et Riguet deviennent membres du Cercle d'études cybernétiques, et confrontent leurs projets à la cybernétique. On s'intéressera au dialogue des projets, aux axes d'unification et de divergence, aux styles, aux stratégies et postulats de ces trois candidats à la généralisation confrontés à la référence constituée par la cybernétique. Quels obstacles vont-ils rencontrer ? Nous présenterons d'abord les trois projets français, puis certains aspects spécifiques de la cybernétique chez Norbert Wiener et William Ross Ashby, avant d'aborder la confrontation des projets au sein et en marge du Cercle d'études cybernétiques.

THÉORISER LES MACHINES
TROIS PROJETS FRANÇAIS DES ANNÉES 1930 AUX ANNÉES 1950

La « mécanologie » de Lafitte

Hormis qu'il était « ajusteur, dessinateur, ingénieur, architecte », on sait bien peu de choses de Jacques Lafitte (1884-1966). Le petit livre *Réflexions sur la science des machines*¹, qu'il a publié en 1932, est en revanche devenu un livre culte pour tous ceux qui s'intéressent à la pensée technique. Ces *Réflexions* rassemblent des idées dont il situe la naissance, qu'il attribue à l'insatisfaction procurée par les classifications techniques existantes, en 1905. Il mentionne une première présentation en 1911 devant des « techniciens », à l'absence de préoccupations théoriques desquels il attribue l'impact médiocre de sa recherche de public et de collaborateurs. Peut-être est-ce la raison pour laquelle, vingt ans plus tard, il publie son essai dans une revue d'intellectuels (démocrates chrétiens), les *Cahiers de la nouvelle journée*.

1. LAFITTE, 1932.

Il baptise *mécanologie* la science des machines telle qu'il l'envisage, et en situe la place dans un tableau des connaissances existantes concernées qu'il ordonne de la sorte² : 1) l'*art de la construction*, qui précède toute science et se compose de savoir-faire spécialisés ; 2) la *mécanographie*, « science descriptive » qui regroupe en fait toute l'érudition historique, ethnographique constituant le matériau préliminaire, « l'élaboration de techniques descriptives diverses : représentations écrites, représentations graphiques des formes et des fonctionnements, représentations symboliques, etc. », ainsi que des « recherches classificatrices et de nomenclature » ; 3) la *mécanologie*, qui recherche des lois et des causes, « l'explication des différences observées » entre les machines³, plus précisément l'« étude des différences observées dans les formes, les structures, les fonctionnements, l'organisation générale, explication de la genèse de chaque type ». Lafitte écrit que, historiquement, ces trois grandes disciplines sont apparues dans cet ordre, et épistémologiquement, se nourrissent chacune des résultats de la précédente ; une répercussion inverse des résultats est aussi envisagée, puisque l'art de la construction peut bénéficier de la mécanologie, et que les codes catégoriels et symboliques de la mécanographie doivent s'élaborer en rapport avec elle (sur le plan méthodologique uniquement, les conclusions et interprétations des historiens restant indépendantes). En fait, il est curieux qu'il confie intégralement la classification et la symbolisation à la mécanographie : s'il est normal d'étudier les codes utilisés avant ou ailleurs, on ne comprend pas très bien la nécessité qu'auraient l'historien ou l'ethnographe d'en produire de nouveaux, en principe inutiles pour le type de savoir qu'ils produisent. Par ailleurs, un autre plan général de distinction de la mécanologie, très important, ne figure pas dans ce tableau. La mécanologie doit « beaucoup aux démarches nécessaires de la mécanique et de la physico-chimie », mais « n'est cependant pas une partie de ces sciences »⁴ :

« Sous l'influence des progrès des sciences mécaniques et physiques, [...] la machine, d'abord considérée comme un transformateur de mouvement, s'est trouvée successivement considérée comme un transformateur de forces, puis d'énergie. Il est aisé de voir que ces définitions différentes reposent toutes sur la considération de certains phénomènes dont la machine est le siège, et non sur la considération de la machine elle-même en tant que phénomène⁵. »

Comment Lafitte définit-il plus précisément l'objet et la méthode de la mécanologie ? Celle-ci « ne peut avoir d'autres objets que l'explication des machines réellement existantes. Elle doit laisser de côté tous les produits imaginaires dont la construction et l'usage n'ont pas consacré l'existence⁶ ». La définition des machines comme « corps organisés construits par l'homme » est en fait très large, et bénéficie de l'indétermination de la notion d'organisation. Elle désigne « le vaste ensemble des engins, instruments, appareils, outils, jouets, constructions architecturales, etc.⁷ », que Lafitte

2. LAFITTE, 1932, p. 34.

3. LAFITTE, 1932, p. 31.

4. LAFITTE, 1932, p. 54.

5. LAFITTE, 1932, p. 30.

6. LAFITTE, 1932, p. 32.

7. LAFITTE, 1932, p. 28.

répartit en trois classes principales : *machines passives*, *machines actives* et *machines réflexes*, apparues successivement et cohabitant sans se remplacer. Les premières, issues de « l'appropriation première de dispositifs naturels existants⁸ », se contentent de résister aux flux de leur environnement sans les transformer ; elles comprennent surtout des formes architecturales. Les secondes sont transformatrices d'énergie ; les troisièmes sont en plus sensibles aux variations de leur environnement.

Que des objets techniques « simples » apparaissent comme des machines rudimentaires, au lieu que ce soit les machines qui soient définies plus typiquement comme des outils perfectionnés, peut surprendre et n'est pas sans poser problème : si c'est en effet la forme la plus « composée », la plus perfectionnée, qui sert de référence pour l'ensemble des objets par élimination régressive des propriétés, on risque une explication téléologique de l'évolution des lignées. En réalité ce n'est pas le cas, et Lafitte précise bien que la nomenclature a quelque chose d'arbitraire ; il motive son choix contre-intuitif par l'intégration croissante de formes évoluées dans les formes primitives. Il ne tient pas, au fond, aux définitions, dont il estime qu'elles viennent en dernier ; il faut d'abord de nombreuses observations « directement faites sur des réalités », car aucune définition de machine « ne peut se former, dans l'abstrait, sur des concepts *a priori*⁹ ».

À vrai dire, Lafitte – quand bien même il le pourrait – ne va pas respecter l'empirisme qu'il revendique. C'est un prisme biologique qu'il emprunte pour structurer ses observations. Cet aspect est en fait moins évident qu'on ne le croirait dans les *Réflexions* elles-mêmes – puisqu'il faut vraiment dénicher dans les dernières pages « la possibilité reconnue d'employer pour les machines, et pour la même façon que pour les êtres vivants, le langage de l'organisation [...] et de l'hérédité¹⁰ » – que dans un article que Lafitte publie en 1933 :

« Ensuite, puisque chaque machine s'offre à nous comme un complexe organique, susceptible de fonctionnement et sujet aux contraintes du temps, chacune d'elles et l'ensemble qu'elles forment peuvent susciter, et suscitent en effet, l'application de disciplines de recherche et d'explication qui sont propres à tout ce qui est organisé. Que l'on veuille ou non que la biologie se porte un jour à s'intégrer dans une organologie, science plus vaste et connaissant tout ce qui fonctionne, il reste, cependant, que l'étude des machines relève, encore, de disciplines étroitement comparables aux disciplines biologiques.

« Mais là encore, pour utile et nécessaire que soit l'exercice de telles disciplines, elles n'ont rien de spécifiquement relatif aux machines. Là encore, le savant qui se penche sur l'organisation et les propriétés qu'elle confère poursuit la recherche d'une généralité transcendante à la machine elle-même.

« [...] Mais, dans l'instant, les sciences naturelles [*i.e.* biologiques] apportent à la mécanique, et tel qu'elles l'ont forgé, l'instrument de mesure qui lui est nécessaire¹¹. »

8. LAFITTE, 1932, p. 70.

9. LAFITTE, 1932, p. 30.

10. LAFITTE, 1932, p. 107.

11. LAFITTE, 1933, p. 145-147.

Cette confirmation d'une inspiration biologique laisse facilement croire à un déterminisme intrinsèque que dénotent d'ailleurs certaines formulations de Lafitte : « Maintenant, de nombreuses observations, faites sur les machines, nous donnent des raisons décisives de penser que l'homme, dans leur création, a procédé suivant un ordre constant et qu'il n'a pas voulu¹². » Pourtant, la démarche de Lafitte peut dérouter le lecteur actuel habitué à la ligne de partage générale entre internalisme et externalisme, lorsqu'il en vient à affirmer que « la mécanologie est une science sociale [...], elle est une partie, extrêmement importante, d'ailleurs, de la sociologie¹³ ». Tout à la fois, donc, l'homme est chaînon essentiel des séries techniques, mais son statut d'inventeur ne lui permet pas de diriger l'évolution. L'intelligence joue un rôle explicatif, puisque les techniques animales, « fruit de l'instinct », n'évoluent pas. Le « flux externe » par lequel les machines se reproduisent, « interférence s'opérant par l'homme », ce sont bien entendu les conditions sociales d'exercice de cette intelligence. Il y a un déterminisme intrinsèque (on ne peut concevoir qu'à partir de l'existant) et un déterminisme extrinsèque à cet ordre des machines « qui n'est pas le fait de l'homme, mais qui tient aux conditions de ses actes créateurs [...] » et qui impose « la considération du milieu social et de ses variations »¹⁴.

L'œuvre de Lafitte est incontestablement originale, tout en s'inscrivant explicitement dans une tradition de recherche par la capitalisation à partir d'un certain corpus, et une critique des classifications et définitions existantes. Elle présente des caractères assez paradoxaux, au minimum amplifiés par l'absence d'archives susceptibles d'apporter des détails et éclairages complémentaires. C'est notamment le cas des formalismes : il serait étonnant qu'en tant que dessinateur et architecte en particulier, Lafitte n'ait cherché aucun moyen de représentation graphique. Et pourquoi reléguer les symbolismes à la mécanographie, alors que l'étude des fonctionnements relève de la mécanologie ? Ces symbolismes doivent-ils ou non être les mêmes que ceux élaborés et utilisés par les ingénieurs ? Toutes questions restant en suspens ; Lafitte précise juste dans son article de 1933 qu'il n'y a pas de maturité suffisante pour recourir aux mathématiques. L'absence d'études de cas, d'analyses détaillées, la relative rareté des exemples sont également paradoxales pour un homme du métier, qui reconnaît lui-même que les techniciens se détournent de la théorie, et qui se revendique empiriste. Les orientations qu'il propose pour la mécanologie oscillent bien souvent entre l'évidence, communément partagée ou aisément vérifiable, et le « pas encore » redoublant de scrupules. Enfin, il est bien contre-intuitif, vu d'aujourd'hui, que l'historien doive former des catégories inspirées de la biologie (plus exactement d'une « organologie » primitive dont la biologie serait le paradigme), dont il n'est d'ailleurs pas supposé faire usage ; peu de chances qu'il souscrive à la division du travail proposée par Lafitte.

L'« Analyse mécanique » de Couffignal

La vie et l'œuvre de Louis Couffignal (1902-1966) attendent encore une étude d'ensemble, par les différentes ramifications et connexions originales entre

12. LAFITTE, 1932, p. 61.

13. LAFITTE, 1932, p. 109.

14. LAFITTE, 1932, p. 61, 109.

considérations théoriques et préoccupations pratiques. Spécialiste des machines à calculer depuis les années 1930, il dépose plusieurs brevets avant de devenir directeur du laboratoire de calcul Blaise Pascal en 1945. S'il est crédité pour être l'un des premiers promoteurs de la supériorité du langage binaire pour le calcul mécanique, il a laissé un mauvais souvenir dans l'histoire de l'informatique française, puisqu'on lui a attribué, avec plus ou moins de raison, une responsabilité majeure dans le retard de son développement. Nous laisserons de côté ce débat pour nous concentrer sur la place qu'occupe la notion de machine dans ses réflexions théoriques.

En 1938, Couffignal soutient à Paris une thèse de mathématiques sous la direction de Maurice d'Ocagne, publiée la même année chez Gauthier-Villars¹⁵. L'auteur y présente une discipline nouvelle qu'il nomme « analyse mécanique », annoncée comme l'aboutissement de « considérations d'ordre très général sur la réalisation des calculs au moyen de machines à calculer, et même sur la réalisation d'un travail de nature quelconque au moyen de machines appropriées à ce travail ». Le titre de l'étude devrait donc être inversé pour comprendre la démarche : la connaissance des machines à calculer sert de paradigme à la connaissance des machines en général. Couffignal, en effet, se produit en expert ès calcul mécanique devant son jury, avec dix ans d'expérience et de dépôts de brevets – il est à ce titre médaillé d'or de l'Office national des recherches scientifiques et inventions –, mais aussi un fort intérêt pour la logique symbolique. Si c'est d'Ocagne qui va l'inciter à développer la mécanisation du calcul, sitôt sa thèse soutenue, Couffignal publie la même année une salve de notes en logique mathématique.

Dans quelle mesure ce qui est valable pour les machines à calculer est-il valable pour toutes les machines ? Couffignal ne donne pas de critère explicite d'extrapolation ; celui-ci repose en fait sur un débat épistémologique avec la tradition de la « théorie des mécanismes », de Gaspard Monge à Franz Reuleaux. Cette tradition a recherché une théorie combinatoire des machines, chaque machine se présentant comme une combinaison d'éléments mécaniques fondamentaux. Si le débat interne porte sur la primauté à accorder aux fonctions ou aux organes, l'optique de cette tradition était de constituer un répertoire d'éléments universels.

« Tous [après Monge] ont eu pour but de dresser une liste *complète* des *moyens* et des combinaisons de moyens mis en œuvre dans les machines ; et, l'ingéniosité des hommes ayant accru sans trêve ces moyens et leurs combinaisons, il en est résulté, tantôt que le sens du terme *machine* a été restreint de façon excessive afin de limiter à un nombre raisonnable la liste des éléments étudiés, tantôt que la liste des combinaisons de mécanismes considérées comme élémentaires a été trop considérablement allongée afin d'embrasser un plus grand nombre de machines ; et c'est ainsi que Reuleaux est conduit à représenter une courroie passant sur deux poulies par une formule composée de 37 symboles abstraits élémentaires dont aucun n'évoque ni une courroie, ni une poulie. [...]

« C'est donc, à notre avis, pour avoir abandonné ce point de vue essentiel qu'une machine ou un organe de machine sont créés par l'homme pour atteindre un but précis et bien déterminé, que l'on a édifié, après Monge, des Théories des mécanismes qui [...]

15. COUFFIGNAL, 1938a.

ne peuvent ni expliquer simplement les machines existantes, ni aider à en construire de nouvelles¹⁶. »

Couffignal veut rétablir la primauté de la fonction, qu'il attribue à Monge, et que ses continuateurs ont contestée. Mais, après ce passage du rasoir d'Occam parmi les mauvais rameaux de la tradition, l'idée demeure bien celle d'un « tableau systématique », susceptible d'être un jour « complet ». À titre programmatique, il n'y a pas de problème pour embrasser l'ensemble des machines, dès lors que différents spécialistes proposeront un catalogue des fonctions de leur domaine, tout comme Couffignal définit dans sa thèse les fonctions basiques des machines à calculer. L'extrapolation est possible à condition de faire crédit de cette possibilité effective de systématisation des fonctions... et à condition que ces dernières prolifèrent bien moins que les organes, ce dont Couffignal ne doute pas : « Il suffira de rappeler, par exemple, que plus de deux cent dispositifs ont été proposés pour réaliser cette fonction de sécurité si élémentaire : éviter le desserrage d'un écrou¹⁷. »

Dans la troisième partie de sa thèse, Couffignal discute des caractères généraux de sa théorie, et de la façon dont il convient de la situer, en la distinguant, notamment de la mécanique appliquée, mais aussi de la biologie. Il différencie trois formes d'étude au sein de l'analyse mécanique :

« Désignant du nom de *machine* tout ensemble d'êtres inanimés ou même, exceptionnellement animés, capable de remplacer l'homme dans l'exécution d'un ensemble d'opérations – ce dernier terme étant pris dans le sens le plus exhaustif – proposé par l'homme, et du nom de *fonction* l'une quelconque des opérations que peut exécuter une machine ou un organe de machine :

« 1) *On considère toutes les machines qui tendent au même but comme formant une même classe, et l'on se propose de chercher quelles fonctions mécaniques elles possèdent, et quels organes ont été imaginés pour remplir ces fonctions.*

« 2) *On considère l'un des buts, bien déterminés, de l'activité humaine, et l'on se propose de chercher s'il existe un ensemble de fonctions mécaniques, et lesquelles, dont la réalisation matérielle constituerait une machine capable d'atteindre ce but¹⁸. »*

La première forme d'étude s'appelle « analyse mécanique descriptive », la seconde « analyse mécanique préfactive » ; on y reconnaît ce que l'on appellera peu de temps après respectivement *analyse* et *synthèse* des systèmes, ainsi que leur caractère « descendant » : on part des fonctions générales pour descendre, via des fonctions spécialisées, vers les pièces. Dans le cadre de la thèse, la première forme est mise en œuvre pour

16. COUFFIGNAL, 1938a, p. 36.

17. COUFFIGNAL, 1938a, p. 35.

18. COUFFIGNAL, 1938a, p. 37-38 (c'est l'auteur qui souligne).

l'analyse des machines à calculer, la deuxième pour proposer d'améliorer mécaniquement « l'exécution des calculs de la mécanique céleste ». Elles sont complétées par une troisième, l'« analyse mécanique abstraite », « dont un objectif important sera sans doute d'établir un critérium des opérations exécutables par la machine, par opposition à celles que l'homme seul pourrait effectuer »¹⁹.

« Nous pensons que, des études de classes particulières de machines qui en constitueront les premiers matériaux, il se dégagera, par la suite, des lois générales relatives à l'exécution mécanique des travaux que se propose l'homme [...]»²⁰.

Au stade de la thèse, Couffignal reste en fait très prudent quant à ces « lois générales » :

« C'est à l'Analyse mécanique abstraite que nous rattacherions la proposition suivante, que nous avons énoncée au sujet de certains types de machines à calculer, et qui nous paraît générale, bien que nous n'ayons pu encore la justifier logiquement ni réunir, en dehors du Calcul mécanique, suffisamment de témoignages de son exactitude pour la considérer comme une loi d'origine expérimentale : *pour atteindre un but déterminé, il correspond à un ensemble de moyens donnés un mode opératoire et une suite d'opérations optima*²¹. »

L'analyse mécanique descriptive est présentée dans la seconde partie de la thèse. Dans l'optique de généralisation qui est celle de Couffignal, elle doit constituer, on s'en doute, un référentiel commun à toutes les machines :

« Pour pouvoir comparer de façon objective les moyens que possèdent les machines actuelles et même pour pouvoir définir ceux que devrait posséder une machine propre à l'exécution de ces calculs, il était d'abord nécessaire de ramener, en quelque sorte, à une commune mesure, les propriétés diverses et souvent purement qualitatives des machines à calculer²². »

Cette « commune mesure » se définit, on l'a déjà dit, par la notion de *fonction mécanique*, dont il est nécessaire à terme de constituer un répertoire universel. La *puissance* d'une machine est l'ensemble de ses fonctions mécaniques, que l'on va représenter par une *formule fonctionnelle*, « assez comparable aux formules développées de la chimie organique ».

Sans entrer dans le détail du codage, précisons juste que les conventions alphabétiques correspondent à la hiérarchie des fonctions et « ne donnent aucune indication sur

19. COUFFIGNAL, 1938a, p. 39.

20. COUFFIGNAL, 1938a, p. 2.

21. COUFFIGNAL, 1938a, p. 39 (c'est l'auteur qui souligne).

22. COUFFIGNAL, 1938a, p. 1-2.

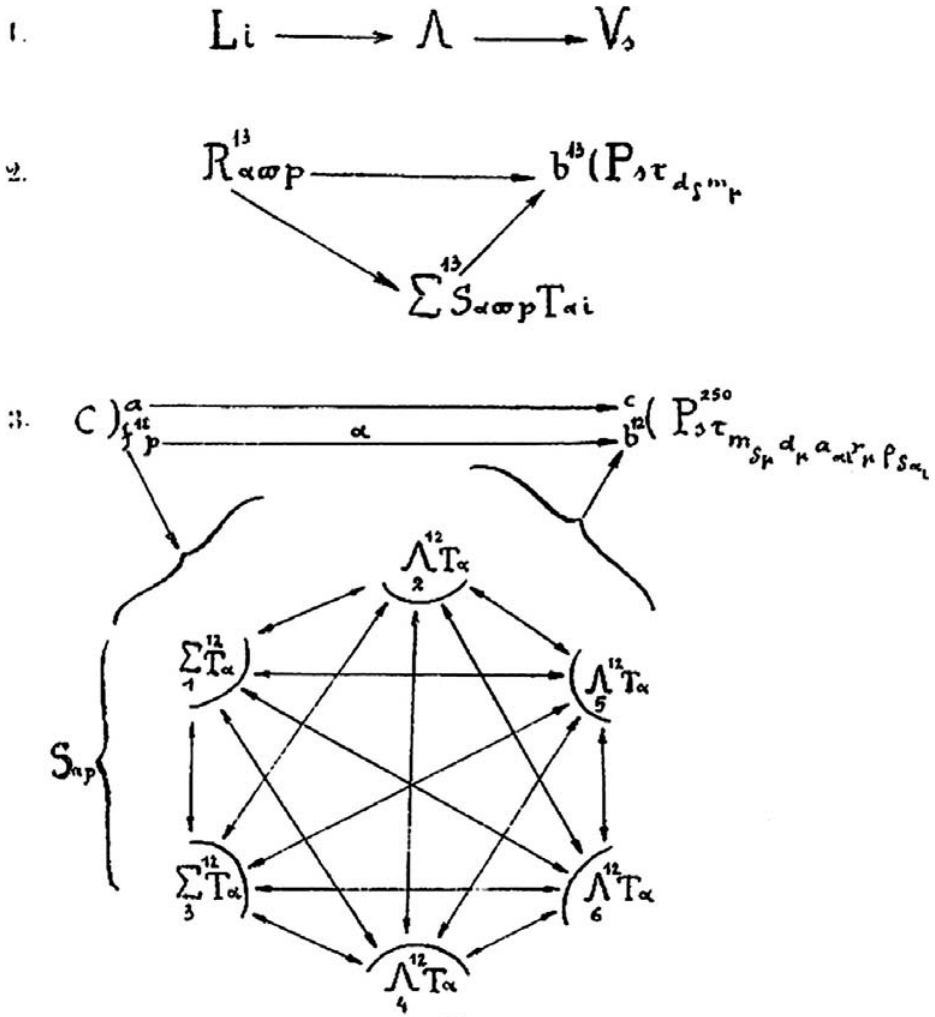


Fig. 1.

- 1, Additionneuse de Pascal.
- 2, Additionneuse moderne.
- 3, Additionneuse moderne.

Fig. 1. Formule fonctionnelle de la puissance d'une machine selon Couffignal²³.

23. COUFFIGNAL, 1938a, p. 30.

la structure mécanique elle-même des organes des machines²⁴ ». C'est ici que se révèle l'importance du symbolisme pour la commensurabilité des classes d'objets :

« Comme cette formule exprimera tous les moyens mis en œuvre dans une machine, et, par suite, toutes les ressources de cette dernière, nous pourrions dire qu'*une machine est plus puissante qu'une autre si la formule fonctionnelle de la seconde est un cas particulier de celle de la première*²⁵. »

Couffignal indique brièvement qu'il ne considère pas l'algèbre comme un moyen d'expression satisfaisant : c'est que pour lui, l'algèbre n'est qu'une arithmétique abstraite, et la finalité d'une machine à calculer est de fournir un résultat numérique, via des opérations dont toutes ne sont pas arithmétiques (comme l'impression et l'effaçage).

La mise à l'écart de l'algèbre au profit des « formules fonctionnelles » laisse dans l'ombre la question des manipulations symboliques ; comment établir avec certitude qu'une formule fonctionnelle est un cas particulier d'une autre, surtout dans des cas complexes ? Couffignal ne le précise pas, bien que l'enjeu dépasse encore ce problème. En effet, une fois différentes classes de machines établies :

« Le rapprochement des formules fonctionnelles de machines de classes différentes fera apparaître ensuite des fonctions communes à plusieurs classes, et conduira vraisemblablement à une classification d'ensemble des fonctions mécaniques²⁶. »

Cette classification transversale pourrait alors être un second facteur limitant la prolifération des entités dans la théorie. Mais quelle est au juste la nature de ce « rapprochement », de cette comparaison différente d'un calcul algébrique ? La réponse explicite ne se trouve pas dans la thèse ; elle viendra des années plus tard, au contact de la cybernétique, comme on le verra plus loin.

Comme Lafitte, Couffignal publie un court article peu de temps après sa thèse²⁷. Plus qu'un simple résumé vulgarisé de l'analyse mécanique, la deuxième moitié considère la mécanisation de la logique déductive en guise d'étude de cas supplémentaire. Par ailleurs, Couffignal fait cette fois siens les termes biologiques d'« anatomie et de physiologie comparées » pour qualifier l'analyse mécanique descriptive.

La thèse de 1938 est au fond très originale et paradoxale par la distance qu'elle essaye de garder par rapport aux mathématiques, et on peut s'interroger sur l'absence de toute référence à la topologie (en dépit de l'intérêt de Couffignal pour Poincaré, et du fait que sa deuxième thèse porte sur le problème du coloriage des cartes). L'ingénieur qui conçoit et commande des pièces métalliques à des sociétés d'outillage s'exprime au moins autant que le mathématicien, dans un mémoire soutenu en mathématiques. Il s'agit clairement de renouveler et dépasser le maître

24. COUFFIGNAL, 1938a, p. 31.

25. COUFFIGNAL, 1938a, p. 9 (c'est l'auteur qui souligne).

26. COUFFIGNAL, 1938a, p. 38.

27. COUFFIGNAL, 1938b.

et la tradition de la théorie des mécanismes, pour un public que l'on devine davantage composé d'ingénieurs que de mathématiciens. Sa théorie sera nécessairement confrontée à d'autres, plus mathématiques, qui auront une conception plus généraliste de l'algèbre et un rapport plus opérationnel à la topologie ; mais aussi à des progrès technologiques fulgurants qui vont remplacer la mécanique par l'électricité. Le répertoire des fonctions, souhaité universel, peut-il survivre à une évolution radicale du répertoire des organes ?

« *Mécanique relationnelle* » et algèbre des machines chez Riguet

Jacques Riguet (né en 1921) est un mathématicien dont l'intérêt s'est focalisé dès le départ sur les rapports entre les différents domaines des mathématiques. Élève du doyen de la faculté des sciences de Paris, Albert Châtelet, il soutient en 1951 sa thèse *Fondements de la théorie des relations binaires*. C'est un travail assez marqué par l'influence croissante de Bourbaki (méthode axiomatique et théorie des ensembles), dont Riguet estime cependant qu'elle a délaissé la notion de relation binaire. Celle-ci, si elle est bien théorisée, doit permettre d'unifier de nombreux domaines des mathématiques, non autour de la notion de structure, mais d'une « certaine partie de ce qui, en mathématiques, présente un caractère combinatoire ». Riguet, au contraire de Bourbaki, accorde à la logique un rôle important pour la pensée mathématique. Il cherche explicitement à renouveler la « caractéristique universelle » de Leibniz. L'objectif de la thèse de Riguet, dans cette optique, est de « fonder rigoureusement le calcul des relations binaires [pour] axiomatiser des théories, expliquer des analogies et “nettoyer” des démonstrations ». Si l'on anticipe déjà sans difficulté l'intérêt de Riguet pour l'algorithmique et le calcul automatique, plusieurs remarques s'imposent. En premier lieu la thèse elle-même ne traite pas de problèmes technologiques ou de machines, même s'il est très brièvement indiqué que « le champ d'application à la technique est particulièrement riche ». D'autre part, durant la préparation de sa thèse, Riguet a fait partie d'un groupe informel avec Marcel-Paul Schützenberger, Paul Braffort et Benoît Mandelbrot. Bien souvent, Riguet va mêler les exigences d'une grande abstraction et d'une grande variété d'applications²⁸ ; l'influence bourbachique, chez lui, ne se traduit ni par le mépris de la logique, des méthodes stochastiques, de la géométrie ou des applications des mathématiques, mais par le souci de lier tout problème, même très concret, aux structures mathématiques les plus générales. Enfin, la notion de machine traverse en fait chez Riguet tous les aspects des mathématiques : elle peut être un modèle résultant d'un calcul, bien sûr ; elle peut être le calcul proprement dit, on le sait depuis Alan Turing ; ici, l'originalité de Riguet réside peut-être dans sa représentation « machine » des mathématiques pures :

« Machinisme et taylorisation, en mathématiques comme ailleurs, supposent la normalisation des pièces détachées et d'abord celle de leur terminologie. Mais ce n'est là qu'une première étape. Pour passer du stade artisanal au stade de la grande industrie, il faut *fonctionnaliser*. Et l'usage de ce terme dans tous les domaines, qu'il s'agisse de

²⁸. Par exemple, il conseille d'aborder l'enseignement des probabilités et statistiques avec la théorie des catégories.

la construction d'un barrage, de la décoration d'un appartement ou du régime imposé à un malade, montre assez bien qu'il s'agit d'une notion d'importance vitale : celle de *fonction*²⁹. »

On comprend bien l'intérêt accordé de ce point de vue aux relations binaires, puisque la notion de fonction est un cas particulier de la notion de relation ; « toute méthode mathématique peut être identifiée à la décomposition d'une relation binaire ou d'une classe de problèmes P_{AB} , A et B étant certains ensembles de relations³⁰ ».

Après sa thèse, Riguet devient ingénieur de recherches au CNRS (jusqu'en 1957). La notion de machine va occuper une place assez importante dans ses recherches. Il ne reste cependant que des traces succinctes du projet théorique explicite : d'un côté, des notes compactes et formalisées publiées dans les comptes rendus de l'Académie des sciences, et de l'autre, des résumés de conférences à des colloques pour lesquels Riguet ne rendait jamais de texte. C'est dans le résumé donné pour les actes du congrès international de mathématiques d'Amsterdam, en 1954, que l'on trouve la présentation la plus globale et la plus concise. L'exposé avait pour titre « applications de la théorie des relations binaires à l'algèbre et à la théorie des machines » :

« La théorie des relations permet d'édifier une vaste mécanique relationnelle [...]. On se borne à des systèmes d'états discrets, ce qui du point de vue pratique est sans inconvénients. Une machine se définit alors comme une application d'un ensemble d'états dans lui-même. Lorsque cet ensemble est muni d'un système de coordonnées relationnelles, on peut définir algébriquement le couplage de deux machines et on peut alors édifier la mécanique à laquelle nous avons fait allusion. [...] Nous avons appliqué cette mécanique relationnelle aux réseaux d'interrupteurs électro-magnétiques, à l'algébrisation du fonctionnement des grandes machines à calculer, au problème du codage³¹. »

On retrouve les notes à l'Académie des sciences. La première établissait une équivalence dans certaines conditions³², elle était complétée ultérieurement par la définition de « systèmes de coordonnées relationnelles », et par d'autres équivalences : entre les notions de machine et d'algorithme ; entre le calcul des relations binaires et le calcul des matrices booléennes. Les relations binaires sont centrales : de façon schématique, une machine est définie par un ensemble d'états et une relation binaire qui explicite les transitions entre ces états. On peut parler d'une « théorie bourbachique des automates », sauf que le terme d'« automates » ne sera popularisé qu'après 1956³³.

Dans son étude sur l'histoire de la théorie des automates³⁴, Jean Mosconi lui consacre quelques pages. S'il fallait parler de « style français » en théorie des

29. RIGUET, 1961, p. 23.

30. RIGUET, 1957, p. 78.

31. RIGUET, 1954.

32. RIGUET, 1953.

33. John von Neumann emploie déjà le terme d'*automata* en 1948, mais c'est la parution des « Automata studies », sous la direction de Claude Shannon et John McCarthy (*Annals of Mathematic Studies*, n° 34, Princeton, 1956), qui va consacrer le terme.

34. MOSCONI, 1989. On peut aussi consulter PERRIN, 1995.

automates, Riguet en serait sans doute représentatif; il faudrait alors analyser plus en détail les relations entre son travail et celui, naturellement, de Schützenberger, mais aussi celui de Claude Berge. Il est un habitué du séminaire d'algèbre de Paul Dubreil (qui fut rapporteur de sa thèse) avec Schützenberger, qui le cite dans sa « théorie du codage ». Et son intérêt pour la représentation graphique n'est sans doute pas étranger à la « théorie des graphes » de Berge³⁵. Si les graphes et autres « représentations sagittales » ont pu tarder à s'implanter en France, en contexte bourbakiste, la marque du style français résiderait en revanche dans la mobilisation systématique de structures algébriques très abstraites pour l'étude des automates. Ultérieurement, cependant, Riguet s'investira dans la théorie des catégories, au contraire des élèves de Schützenberger qui ne retiendront pas cette option. Mais ce clivage sort du cadre de notre article.

Le terme récurrent de « théorie des machines » s'avère à peu près synonyme de « logique générale des circuits »; on peut noter cependant une évolution du cadre technologique de référence: le paradigme plus ou moins implicite en arrière-plan serait d'abord l'électronique (analyse et synthèse des circuits), puis l'informatique théorique (structure des programmes). On aurait donc chez Riguet un passage du *hardware* au *software* sur la base de la même théorie et des mêmes outils. Les machines de base qu'il s'agit de coupler sont d'abord des « multipôles », terme générique pour les composants des circuits électroniques. Puis ces composants deviennent plus abstraits, plus « intellectuels », sous la forme par exemple de problèmes à résoudre dans un certain ordre. Un article de 1957, « Le calcul des relations en tant qu'outil méthodologique », en donne une bonne idée. Le principe consiste à « rechercher s'il existe des méthodes machinales pour passer de certaines méthodes machinales à d'autres méthodes machinales », où le terme de méthode équivaut à peu près à celui d'algorithme :

« [...] factoriser des méthodes en sous-méthodes ou faire la synthèse d'un multipôle de manière à ce qu'il apparaisse comme le résultat de couplages d'un certain nombre de multipôles plus simples, semblent être des problèmes assez analogues. Le calcul des relations binaires, qui permet d'axiomatiser le concept de machine, révèle en fait la quasi-identité de ces problèmes³⁶. »

On a assez naturellement l'impression que la théorie des machines de Riguet ne prend pour objets que des machines contemporaines, et, partant, qu'elle n'a pas de valeur pour les machines du passé. Du point de vue de ses préoccupations, c'est sans doute vrai; il ne formule nulle part l'idée d'un englobement universel de toutes les machines, il ne délimite pas d'abord le domaine des objets pour ensuite chercher la méthode adéquate, il part au contraire de la méthode, dans et pour un cadre technologique relativement neuf. Mais – et voilà qui peut surprendre autant les

35. Remarquons que Berge passe une année à Princeton en 1957 (le fief de von Neumann), un an après les « Automata Studies », et un an avant sa théorie des graphes. L'Appendice V de sa thèse, publiée chez Dunod, est écrit par Riguet: « Notice sur quelques principes fondamentaux d'énumération. »

36. RIGUET, 1957, p. 81.

mathématiciens ou les ingénieurs que les historiens des techniques –, il présente en 1959, au séminaire Dubreil, sous le titre de « théorie du tissage », un modèle algébrique du « métier Jacquard »³⁷.

Après un séjour au laboratoire de recherche d'IBM à Zürich, Riguet se tourne vers l'enseignement. Il n'a pas laissé d'ouvrage, malgré des opportunités diverses et prestigieuses : une *Théorie des réseaux d'interrupteurs* chez Gauthier-Villars, une *Encyclopédie des mathématiques modernes* en 3 volumes chez Mouton puis chez Hermann... À ne considérer que les machines (circuits, automates), il se pourrait déjà qu'il n'ait pu parvenir à une version satisfaisante à cause de l'écart entre son optique systématique et le développement rapide du secteur à l'époque. Quel traité aurait pu axiomatiser tous ces résultats, nombreux à l'échelle internationale et assez nouveaux pour que leur interprétation requière encore du temps ? Est-ce une ironie de l'histoire qu'aucune machine ne puisse se charger d'un tel labeur ? On laisse le lecteur en juger.

CONVERGENCES : LA CYBERNÉTIQUE

À toute époque, les théories des machines tendent à se construire en se positionnant par rapport aux savoirs biologiques (comparaisons avec le vivant) et/ou aux formalismes disponibles. Vers le début du xx^e siècle, on observe des tendances assez générales à la formalisation et à la théorisation, aussi bien dans les sciences de l'ingénieur qu'en biologie. Dans les premières, on retient divers regroupements de problèmes, à différentes échelles. Pour ce qui nous intéresse ici, plus particulièrement, une uniformisation de différentes traditions technologiques (gyroscopie, conduite de tir, télécommunications)³⁸, et le remplacement des méthodes temporelles par des méthodes fréquentielles, corrélatif de l'importance croissante des techniques électriques par rapport aux techniques mécaniques³⁹. En biologie, la question de l'unification théorique doit être abordée sous plusieurs angles, en particulier : l'importance du paradigme évolutionnaire, la distinction d'avec la physique, et le statut des mathématiques⁴⁰. La convergence des théories des machines, s'inscrivant dans des convergences à plus grande échelle, peut ainsi apparaître à l'époque comme procédant d'une dynamique d'unification crédible et naturelle.

« Darwinian machines » de Wiener

Mathématicien au MIT, l'Institut de technologie du Massachusetts, et passionné de biologie depuis l'enfance, Norbert Wiener (1898-1964) est assez représentatif de la convergence entre les axes naturaliste et formaliste. La cybernétique n'est que l'une de ses nombreuses contributions aux sciences et aux techniques. Les travaux qu'il mène au début de la guerre (introduction des méthodes stochastiques en conduite de tir) se conjuguent avec son intérêt pour la physiologie, sous la forme d'un principe

37. RIGUET, 1959.

38. MINDELL, 2002.

39. Voir REMAUD, 2004, p.8, qui précise toutefois que « le consensus autour d'un vocabulaire commun n'a commencé à s'opérer qu'à partir de la fin des années 1950 ».

40. Nous renvoyons ici à VARENNE, 2004, et à la thèse en cours de David POUVREAU (Paris, École des hautes études en sciences sociales).

d'analogies entre systèmes régulés mécaniques, vivants ou sociaux sur la base du schème de *feedback* d'information. Bien que le statut que Wiener donne à la cybernétique ne soit pas toujours clair – ni d'ailleurs chez la plupart des commentateurs –, il n'en fait pas pour sa part une théorie universelle des machines. C'est plutôt la cybernétique qui étudie des types particuliers (régulés) d'une classe de machine assez générale correspondant à une notion courante chez les ingénieurs, celle de « transducteur ». Ce terme désigne tout appareil qui transforme un signal, reçu en entrée et restitué en sortie. Ce qui définit le transducteur, c'est ce qu'il *fait*, c'est l'opération qu'il effectue sur le signal qui le traverse. C'est la base que Wiener choisit pour sa notion de machine :

« Toute machine peut être conçue comme possédant un certain nombre d'entrées provenant du monde extérieur, qu'elle combine pour les lui restituer en un certain nombre de sorties. Cette généralisation est valable pour toute machine, qu'elle soit électrique, mécanique ou d'une tout autre sorte⁴¹. »

On voit qu'une perspective importante est adoptée quant au choix de l'objet. Pour Wiener, du point de vue épistémologique, le fonctionnement prime sur la structure, le dynamique sur le statique. La catégorie de machine n'est pas fondée sur la nature ou la structure de ses individus.

Puisque toute machine se définit par son opération, et que toute opération est en principe représentable par une fonction (au sens mathématique), connaître une machine, c'est connaître une formule mathématique, qui sera déterminée par le contexte. On voit ici la différence d'une approche en termes de mathématiques « pures », en ce sens qu'il ne s'agit pas de calculer la forme de la machine pour ensuite la construire. Avant tout, cette démarche tire sa signification de problématiques rencontrées par les ingénieurs, mais aussi, de manière plus générale, par des expérimentateurs (physiciens ou biologistes) qui désirent explorer un système inconnu. On peut en effet avoir affaire à des machines que l'on ne connaît pas ; soit que l'on ne puisse pas en analyser la structure interne, soit que cette structure soit trop complexe pour que l'on puisse en inférer les propriétés opérationnelles. Il s'agit de l'approche « boîte noire », ce terme étant attribué aux appareils que les ingénieurs militaires récupéraient dans des avions abattus, et dont ils essayaient de déterminer la fonction sans les ouvrir de peur qu'ils n'explorent – de même que les physiologistes ne peuvent se contenter de l'anatomie d'un organisme autopsié, puisque sa mort annule justement ce qui en fait un organisme.

Wiener élabore un modèle d'analyse des transducteurs dans les années 1950⁴². Il se présente sous la forme d'un dispositif expérimental permettant d'approximer un transducteur inconnu (boîte noire) à partir d'un transducteur dont on connaît la structure interne (boîte blanche) et auquel on va le coupler.

41. WIENER, 1962, p. 2. Nous avons traduit, ici et par la suite, toutes les citations de l'anglais.

42. WIENER, 1958, p. 88-100 (leçons 10 et 11 : « Nonlinear Systems » I & II).

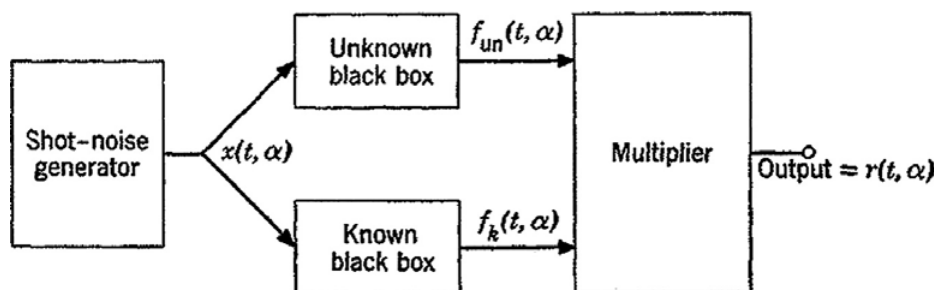


Fig. 2. Méthode d'analyse des transducteurs de Wiener⁴³.

Le principe consiste à injecter un « bruit blanc » simultanément dans les deux transducteurs, puis récupérer et comparer leurs signaux de réponse. La réponse de la boîte noire est analysée sous la forme d'un coefficient appliqué à une fréquence donnée en entrée. C'est une technique qui s'inspire de l'analyse harmonique, dont Wiener est alors sans doute la principale autorité. Schématiquement, une courbe, ou un signal, peuvent être décomposés en un certain nombre de sinusoides multiples d'une harmonique fondamentale, chacune étant pondérée par un coefficient. L'objet peut alors être défini par la collection de ces coefficients. La difficulté consiste à en connaître le maximum, puisqu'il existe aussi bien une infinité d'harmoniques. L'intérêt du bruit blanc, à cet égard, est de constituer un signal qui comporte toutes les fréquences à la même intensité. C'est un peu comme si on envoyait au système toutes les stimulations possibles, en un temps fini; on récolte alors la gamme de toutes ses réponses, et on l'a caractérisé complètement du point de vue opérationnel, en un temps beaucoup plus court que si l'on envoyait signal après signal en variant légèrement la fréquence à chaque fois. Les coefficients que l'on a récoltés vont servir à paramétrer les réglages de la boîte blanche pour qu'elle vienne s'aligner par *feedback* sur le fonctionnement de la boîte noire; ainsi, plus l'on connaît de coefficients, plus l'on va pouvoir régler précisément la boîte blanche et obtenir une simulation matérielle du transducteur inconnu. De ce dernier, en effet, on ignore si les coefficients obtenus ont un référent physique. Moyennant améliorations et variantes⁴⁴, ce modèle connaît toujours une grande postérité pour l'identification des systèmes non linéaires, tant pour l'analyse des machines que pour l'exploration fonctionnelle de systèmes biologiques.

Au début des années 1960, Wiener va en imaginer des interprétations biologiques. À partir de la capacité de son modèle à répliquer indéfiniment une machine à partir d'une autre machine, il n'hésite pas à parler de « phylogenèse » et d'« ontogenèse ». Du point de vue des mécanismes logiques impliqués, il ne voit pas de différence fondamentale entre une machine capable d'apprendre, et une machine qui va se former à

43. WIENER, 1958, p. 97.

44. La variante standard est le modèle de Hammerstein. Pour des références détaillées, voir par exemple GIANNAKIS et SERPEDIN, 2001.

l'image d'une autre (qu'il qualifie même de *genetic machine*⁴⁵). L'analogie lui paraît intéressante tant du point de vue de l'hérédité que de celui de l'apprentissage. La nature des phénomènes comparés, électriques ou chimiques, lui semble secondaire. La base dynamique qu'il estime commune à son modèle et à la génétique est celle des variations aléatoires : le couplage des deux transducteurs est en effet sujet au « bruit », donc il existe une probabilité que la réplique de la boîte noire ne soit pas entièrement fidèle. Sur un grand nombre de répliques données, certaines pourront s'avérer fonctionnellement fiables, d'autres non. Les machines les moins adaptées aux stimulations aléatoires de l'environnement ne seront pas reproduites, les autres pourront à leur tour transmettre les variations acquises⁴⁶. Ailleurs, Wiener se réfère à l'histoire des générateurs de centrales électriques, et suggère que « le système en parallèle avait une meilleure homéostasie que le système en série, si bien qu'il a survécu tandis que le système en série s'est éliminé par sélection naturelle⁴⁷ ». Dans les deux cas, l'analyse de l'évolution technique se fait par l'intermédiaire de schèmes « biologiques », eux-mêmes mobilisés dans le cadre des analogies cybernétiques entre phénomènes vivants et dispositifs techniques.

On constate la mise en place d'un cadre potentiellement susceptible, tel qu'il est perçu par les acteurs de l'époque, de fondre une approche naturaliste et une approche formelle de la connaissance des machines. Ce n'est pas Wiener lui-même, cependant, qui va développer ce projet de la manière la plus explicite. Dans un traité de forme plus canonique qu'il envisageait d'écrire⁴⁸, mais qui ne verra pas le jour, la question d'une théorie générale des machines n'était pas prévue au programme en tant que telle.

« *All possible machines* ». Ashby et ses échanges avec Riguet

William Ross Ashby (1903-1972) est un psychiatre anglais qui développe très tôt des réflexions personnelles sur les comportements adaptatifs. Le problème qui l'occupera le plus sera la question de savoir comment le cerveau peut à la fois être un mécanisme (complexe) et être capable d'adaptation. Tout en restant très marqué par les exigences de l'expérimentation biologique, Ashby bénéficie également d'une formation d'ingénieur qui lui permet de construire des machines (notamment le célèbre *homeostat*). Dans les années 1950, sa principale préoccupation théorique consiste à établir les fondements d'une mécanique abstraite, comprise comme théorie des mécanismes. Son œuvre n'a pas encore fait l'objet d'études d'ensemble et de détail ; on ne donnera ici que des indications générales en rapport direct avec le thème de l'article.

Sa rencontre avec la cybernétique est, de façon clairement réciproque, essentielle et décisive. C'est ainsi que sa célèbre *Introduction to Cybernetics* de 1956 expose la portée du projet :

« La cybernétique est aux machines réelles – électroniques, mécaniques, cérébrales ou économiques – ce que la géométrie est aux choses réelles de notre espace terrestre. [...]

45. WIENER, 1962, p. 10. « *This process has a logical similarity – again, I don't say a similarity in detail – to the fundamental biological process of life* » (*ibid.*, p. 8).

46. On ne rentrera pas ici dans une discussion détaillée de l'analogie. Voir WIENER, 1964, p. 27-48.

47. WIENER, 1948, ici 1961, p. 202. Le chapitre est ajouté dans la 2^e édition de 1961.

48. WIENER, 1952.

Elle prend pour objet d'étude le domaine de "toutes les machines possibles", et n'est que secondairement intéressée de savoir que certaines d'entre elles n'ont pas encore été réalisées, que ce soit par l'Homme ou la Nature. Ce qu'apporte la cybernétique, c'est le cadre d'analyse dans lequel toutes les machines individuelles peuvent être ordonnées, mises en rapport et comprises⁴⁹. »

Les lignes qui suivent impliquent des aspects significatifs pour notre étude: que l'objet scientifique soit idéal et n'existe pas nécessairement dans la nature, écrit Ashby, est aussi vrai pour celui qui étudie les machines que pour le physicien qui traite des gaz parfaits, et – ce qui nous intéresse davantage – le biologiste qui étudie une espèce disparue. Or les organismes vivants sont des machines⁵⁰, et ceux qui appartiennent à une espèce disparue n'ont pas de raison de faire exception à la règle. L'horizon est celui d'une modélisation intégrale des lignées (au moins pour les évolutions morphologiques et fonctionnelles); même si Ashby ne le dit pas, sa remarque inscrit bien son travail dans la situation que nous avons mentionnée. Elle supposerait que la cybernétique – telle qu'il l'entend – fournisse en fin de compte le cadre formel général unifiant la biologie; si un tel espoir était sans doute au-delà des ambitions explicites d'Ashby, les mots qui dépassent la pensée ne sont jamais insignifiants. Tout au moins, pour revenir au thème de cet article, impliquent-ils cet idéal de convergence entre histoire naturelle des machines et algèbre des machines. On a donc là, avec la cybernétique telle que la définit Ashby, le dispositif qui permettrait en principe une convergence maximale de différents types de projets de théorie des machines – en principe seulement, comme on le verra plus loin.

Le langage de cette théorie, dans la suite du livre comme dans les recherches ultérieures d'Ashby, est l'algèbre ensembliste. C'est vers des mathématiques « françaises » qu'il se tourne: les traités de Bourbaki, mais aussi les recherches de Riguet. Cette dernière sollicitation fait l'objet d'une correspondance assez abondante dans les années 1950:

« Je suis désireux au possible d'utiliser vos méthodes dans mon travail. Vous trouverez ci-jointe une formulation de ma méthode, dans votre notation, pour représenter la connexion d'éléments pour construire une "machine". [...] il est d'une importance fondamentale, pour tout travail sur les mécanismes, que je dispose d'une méthode de représentation complètement rigoureuse. Je suis persuadé que la future physiologie du système nerveux sera basée sur des méthodes telles que celles que vous développez actuellement⁵¹. »

49. ASHBY, 1956, p. 2.

50. L'optique générale d'Ashby n'est pas, on s'en doute, de réduire les organismes vivants à des machines, mais de prendre ces organismes comme points de référence pour chercher une théorie abstraite des mécanismes capable d'assumer leur complexité. ASHBY, 1951, p. 1 : « Il est apparu que lorsqu'on doutait du fait que le cerveau soit ou non une machine, nos doutes reposaient principalement sur le fait que l'on entendait par "machine" un mécanisme d'un type rudimentaire. Familiers de la bicyclette et de la machine à écrire, on risquait de les considérer comme le type de toutes les machines. La dernière décennie, cependant, a corrigé cette erreur. Elle nous a appris à quel point notre perspective était restreinte, en développant des mécanismes qui ont largement transcendé les limites de ce que l'on croyait possible, et que l'idée de "mécanisme" était encore loin d'avoir épuisé ses possibilités. Aujourd'hui, on sait seulement que ces possibilités courent bien au-delà de ce que l'on peut en apercevoir. »

51. Ashby à Riguet, 20 avril 1953 (archives privées Jacques Riguet).

« Merci beaucoup pour l'exemplaire de votre thèse [...]. J'ai commencé à l'étudier, mais il faudra du temps avant que je me familiarise avec. Je possède à présent la Théorie des ensembles de Bourbaki, ainsi que son Algèbre. Tout ceci est nouveau pour moi, mais je suis sûr que cette branche des mathématiques, bien plus générale que les mathématiques numériques et linéaires, sera de la plus grande importance pour la théorie abstraite des machines et des mécanismes cérébraux. [...]

« J'étais très excité de trouver, au chapitre I de l'Algèbre de Bourbaki, une définition de la "loi de composition externe", qui est exactement ce que je considère être l'essence d'une "machine" [...]. Est-il possible qu'une algèbre soit la représentation appropriée d'une machine, ou d'un mécanisme cérébral? Si c'est le cas, toutes les propriétés générales bien connues des machines devraient être identifiables dans les propriétés correspondantes des algèbres. [...] Je suis certain que les fondements résident dans ces régions générales [...]. Votre calcul des relations semble ici fort prometteur, précisément en vertu de son extrême généralité⁵². »

Ashby s'investit dans l'appropriation de ces nouveaux outils. Les échanges avec Riguet s'intensifient, et, fort de nouvelles responsabilités⁵³, il essaye de faire financer une collaboration : « [...] il ne semble pas y avoir de doute que la recherche en cybernétique réclame absolument [*is crying out for*] un texte que, pour autant que je sache, nous deux seuls pouvons écrire⁵⁴. » Riguet répond à l'appel malgré sa charge d'enseignement en Sorbonne. C'est en fait un court rapport de dix pages qui sort fin 1960⁵⁵ ; un plan d'ouvrage, vraisemblablement destiné à constituer le traité tant désiré, est resté à l'état d'esquisse⁵⁶. Si Ashby prend acte dès 1960 de l'intérêt croissant de Riguet pour la théorie des catégories, lui-même ne s'écarte pas en pratique du cadre ensembliste⁵⁷. On verra plus loin que la question de l'aptitude de ce dernier à se faire le langage et la théorie universels de « toutes les machines possibles » s'avèrera problématique.

52. Ashby à Riguet, 19 mai 1953 (archives privées Jacques Riguet). Une note manuscrite précise : « L'article [joint à la lettre], écrit il y a quatre ans, montre exactement ce que je souhaite dorénavant éviter grâce à la théorie des ensembles ! »

53. En 1959, Ashby prend la direction du Burden Neurological Institute de Bristol. En fait, il va n'y passer qu'une année puisqu'il prendra un poste aux États-Unis, au département de génie électrique de l'université de l'Illinois, de 1960 à 1970.

54. Ashby à Riguet, 5 juin 1959 (archives privées Jacques Riguet).

55. ASHBY et RIGUET, 1960. Il s'agit d'établir conceptuellement (sans formalisme), les conditions nécessaires et suffisantes pour qu'un système adaptatif puisse continuer à mémoriser son expérience sans « écraser » au fur et à mesure sa mémoire existante.

56. Non daté, il est titré *The Complex Machine and the Brain or Combinatorial Dynamics*, avec pour titre alternatif *Complex Mechanism and the Brain – A Study of Combinatorial Dynamics*. Topologie et catégories sont au programme, notamment pour l'étude des « systèmes excessivement complexes ».

57. ASHBY, 1962, en est bien représentatif. Ce rapport commence par une présentation succincte de la théorie des ensembles ; il définit ensuite la notion de machine et différentes propriétés, et discute cette notion dans le contexte de théories biologiques (notamment la « biologie analytique » de Gerd Sommerhoff).

Un lieu de convergence pour les projets français : le Cercle d'études cybernétiques

Il faut attendre la fin de l'année 1948 pour que la cybernétique trouve une visibilité « officielle » dans le champ scientifique et technique international, avec la parution du fameux ouvrage de Wiener *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. La France, sortant d'un relatif isolement dû à l'Occupation, ne manifesterait en revanche pas de retard particulier pour s'en approprier les questions. Il est intéressant de noter que ce livre ne se présente absolument pas comme un essai de théorie générale des machines, et que ce sont les Français, en un certain sens, qui le tirent dans cette aire de discussion explicite. John von Neumann avait certes déjà formulé son projet de « théorie générale des automates » à l'occasion des premières rencontres liées à la cybernétique, mais avec des orientations différant déjà un peu de celles de Wiener. Les Anglais ne semblent pas avoir davantage thématiquement explicitement la cybernétique sous cet angle⁵⁸. Quoiqu'il en soit, pour la France, on dispose de quelques traces de cette mobilisation. La convergence des projets théoriques va être mise en jeu dans le cadre d'une convergence des acteurs. Un lieu d'échange explicite se crée dans l'espoir de favoriser l'échange intellectuel. Le grand congrès de Paris de 1951 sur « Les machines à calculer et la pensée humaine », rassemblant notamment (pour ce qui nous concerne ici) Ashby, Wiener, Couffignal, Riguet, se termine sur la remarque d'André Lichnerowicz quant à l'inexistence d'une définition claire de la notion de machine, rendue d'autant plus difficile par l'évolution technologique⁵⁹. Peut-être qu'un séminaire régulier offrirait de meilleures conditions qu'un grand congrès international pour la généralisation d'un concept à partir d'approches divergentes ?

En 1949, un jeune polytechnicien, Robert Vallée, s'enthousiasme pour le livre de Wiener, et fonde avec deux de ses collègues un Cercle d'études cybernétiques (CECyb)⁶⁰. Pierre Ducassé, philosophe et historien intéressé par la cybernétique, ouvre les portes de l'Institut d'histoire des sciences – dont il est le secrétaire – aux réunions du CECyb, ainsi que les colonnes de sa revue *Structure et évolution des techniques*⁶¹, et enfin la composition d'un numéro entier de *Thalès* (la revue de l'Institut) à Vallée. La seule liste des membres du CECyb est en soi d'un intérêt remarquable. Louis de Broglie, qui s'intéresse alors à la théorie de l'information, en est le parrain. Outre le neurophysiologiste Alfred Fessard, du Collège de France, le biochimiste

58. On sait notamment qu'un groupe de réflexion réunissait, entre autres, Ashby, l'autre grand nom de la cybernétique anglaise William Grey Walter, mais aussi Alan Turing. On sait encore peu de choses sur ce « Ratio Club » (voir HUSBANDS et HOLLAND, 2008). Il est probable que la question d'une théorie générale des machines ait été abordée informellement. Il n'est pas inutile de préciser que la « machine de Turing » est néanmoins entièrement indépendante de la cybernétique, même dans les cadres du cognitivisme ou encore du codage génétique. On a affaire à deux schématismes différents (ce qui ne les empêche pas d'être compatibles), ce que nous retenons comme critère pour distinguer la cybernétique du thème de la mécanisation du calcul, contrairement à d'autres historiens.

59. Voir *Les Machines à calculer et la pensée humaine*, 1953, p. 562. Couffignal lui répond alors en récapitulant ses travaux relatifs à l'analyse mécanique.

60. VALLÉE, 1990.

61. Voir Ronan LE ROUX, « Pierre Ducassé et la revue *Structure et évolution des techniques*, 1948-1964 », article en préparation pour la *Revue d'histoire des sciences*.

Serge Lissitzky, ainsi que des mathématiciens (comme Benoît Mandelbrot ou Georges Théodule Guilbaud), des médecins et des philosophes, on y retrouve des noms significatifs dans le cadre de cet article, à commencer par Jacques Lafitte, Louis Couffignal et Jacques Riguet. Y figurent d'autres grands spécialistes des machines : Albert Ducrocq, constructeur d'un des premiers robots ; François Le Lionnais, qui essaiera d'apprendre aux machines à jouer aux échecs ; François Paycha, inventeur d'une machine pour réaliser des diagnostics médicaux automatisés ; Marc Pélegrin, un des premiers spécialistes français des asservissements (théorie du *feedback*) ; Jacques Samain, inventeur d'une machine à cartes perforées qui sera largement utilisée dans les administrations ; Jacques Sauvan, spécialiste d'intelligence artificielle et futur membre du Groupe des Dix⁶² ; les ingénieurs et vulgarisateurs Pierre de Latil et Uri Zelbstein ; et enfin Norbert Wiener lui-même, qui rencontrera le CECyb à deux reprises.

La première contribution du Cercle devait être bibliographique : il s'agissait de réunir des références sur la cybernétique pour un numéro de la revue *Thalès*. En fait, c'est un numéro entier qui va être pris en charge par Vallée. Parmi les contributions originales figurent l'article « Statistical Machinery » d'Ashby, un article important de Couffignal sur « La mécanique comparée » (que nous aborderons plus loin, parce qu'il reprend en partie le projet de l'analyse mécanique), ainsi qu'un court article du R. P. François Russo, historien des sciences et des techniques et membre du CECyb, intitulé « La cybernétique située dans une phénoménologie générale des machines ». Le propos en est suggestif. Même si le concours des catégories déclinées dans l'article à une théorie générale semble se borner à une classification – scolastique ? – des machines, on voit du moins que la bénédiction donnée par le jésuite n'est pas complètement gratuite, puisqu'elle tend à tirer la cybernétique vers ce champ de discussion⁶³. Associée, dans le cadre du numéro de *Thalès*, à l'article de Couffignal dont nous allons parler plus loin, elle peut augurer d'une certaine orientation des débats au sein du CECyb.

Des quatorze séances organisées en deux ans (de novembre 1951 à novembre 1953), il ne reste presque aucune trace. Remarquons que huit d'entre elles sont prises par des exposés de Lafitte et de Riguet. Lafitte, « découragé par le silence presque total⁶⁴ » reçu par ses *Réflexions sur la science des machines* de 1932, trouve dans le CECyb l'occasion de reprendre ses idées et de les confronter à une génération nouvelle. Quatre conférences sur « Le monde des machines » sont programmées, auxquelles assistent les membres du CECyb et les étudiants de l'Institut d'histoire des sciences et des techniques. La troisième conférence s'appelait d'abord « L'outillage réflexe : la cybernétique », titre que Lafitte remplace trois mois plus tard par « Monde des machines : développements et limites ». Cette modification atteste que Lafitte essaie de reprendre son élaboration dans les termes de la cybernétique, cherche une continuité, espère

62. Il s'agit d'un club de réflexion (notamment sur les rapports entre science et politique) qui a réuni, entre 1969 et 1976, différentes personnalités telles que Michel Rocard, Henri Atlan, Henri Laborit, André Leroi-Gourhan, Michel Serres...

63. Russo, 1951, p. 69, 75 et Russo, 1955. Voir aussi notre article, « Influence des projets de théories des machines sur l'histoire des techniques chez P. Ducassé et F. Russo », à paraître dans Anne-Lise REY, dir., *Histoire et méthode. Quelle histoire font les historiens des sciences et des techniques ?* (Paris, société française d'histoire des sciences et des techniques).

64. Lafitte à Vallée, 24 juin 1952 (archives privées Robert Vallée).

amorcer une capitalisation. On reconnaît en effet clairement la catégorie des « machines réflexes », qui sont donc mises en équivalence directe avec la cybernétique. Mais pourquoi le changement de titre ? Pourquoi ce retrait d'une mention explicite de convergence « officielle » entre mécanologie et cybernétique, alors que la correspondance entre machines réflexes et *feedback* paraît si naturelle, mais surtout que c'est bien là le motif qui justifie en principe l'intervention du conférencier ? C'est peut-être un effet de la crainte de Lafitte de paraître désuet devant une assemblée d'éminents spécialistes de la question en entrant dans des détails plus techniques :

« Au reste, je ne suis pas sans éprouver une certaine appréhension à la pensée qu'il me faut rentrer en lice après près de vingt ans de silence et de retraite intellectuelle, vingt ans durant lesquels j'ai poursuivi des tâches pratiques assez éloignées, en apparence, de mes recherches⁶⁵. »

On ne sait pas dans quelle mesure cette « appréhension », que l'on retrouve exprimée dans les lettres à Vallée, a pu se nourrir des discussions faisant suite aux exposés. Il ne serait pas impossible que, confronté sans doute pour la première fois au public qu'il devait attendre depuis vingt ans, Lafitte se sente contraint de remanier ses catégories initiales – ce qui pourrait aussi valoir pour les machines réflexes. Quoiqu'il en soit, il ne semble pas pouvoir se contenter d'exposer au CECyb ce qu'il avait écrit vingt ans plus tôt. Le contact avec la cybernétique ranime le projet mécanologique, et Lafitte parle de se lancer dans une rédaction à partir de ses conférences : « J'ai l'espoir de pouvoir bientôt me remettre au travail », écrit-il finalement à Vallée⁶⁶. Il lui demande aussi de le présenter au mathématicien Georges Th. Guilbaud, également membre du CECyb. Guilbaud avait publié en 1950 un article d'introduction vulgarisée à la cybernétique dans lequel il mentionnait les *Réflexions sur la science des machines* de Lafitte⁶⁷. Il préparait alors la première édition du « Que-sais-je ? » intitulé *La Cybernétique*, lequel va aussi situer la mécanologie dans la généalogie des idées menant à la cybernétique⁶⁸. On ne sait pas si la rencontre a eu lieu, mais il est permis de rêver à ce qu'aurait pu donner une collaboration entre le théoricien visionnaire et le mathématicien érudit modélisant les « caractères d'organisation » et les « séries rameuses » du monde des machines...

Comme pour mieux marquer le contraste des projets, la série des conférences de Lafitte est immédiatement relayée par une autre série de quatre exposés de Riguet, consacrés aux réseaux : « Introduction à la théorie des réseaux d'interrupteurs », « Analyse et synthèse des réseaux combinatoires », « Réseaux séquentiels et applications (I-II) ». Le contexte de ces exposés, ce sont les applications concrètes auxquelles Riguet s'intéresse dans le prolongement de sa thèse. C'est au même moment qu'il prépare sa première note sur les machines pour les comptes rendus de l'Académie des Sciences, et le manuscrit de son manuel sur les réseaux d'interrupteurs. On aura

65. Lafitte à Vallée, 23 novembre 1952 (archives privées Robert Vallée).

66. Lafitte à Vallée, 20 avril 1954 (archives privées Robert Vallée). Nous perdons ensuite toute trace de Lafitte, et ignorons l'existence d'archives ou de textes susceptibles d'approfondir le projet.

67. GUILBAUD, 1950, p. 284.

68. GUILBAUD, 1954, chap. II, §1 et 2.

noté que Mandelbrot est aussi membre du CECyB (il y donne l'une des premières conférences), ce qui permet de penser que le Cercle est pour tous deux un débouché possible pour les préoccupations qu'ils partageaient quelques années auparavant avec Schützenberger et Braffort. Au-delà de sa fréquentation du CECyB et de ses échanges avec Ashby, Riguet a-t-il été marqué par la cybernétique? Il la perçoit comme un domaine d'application fructueux pour sa théorie, qui « permet d'envisager sous un jour nouveau les problèmes cybernétiques⁶⁹ ». Il intervient aux congrès internationaux de cybernétique de Namur⁷⁰. C'est sans doute par l'intermédiaire de la cybernétique et d'Ashby que Riguet éprouvera un intérêt jamais démenti pour la biologie, puisqu'on le retrouve des années plus tard à animer des rencontres sur des applications de la théorie des automates dans les sciences du vivant; mais la cybernétique n'est pas pour lui le cadre de référence spécifique pour la théorie des machines, qu'il va trouver dans une abstraction toujours croissante avec la théorie des catégories. En 1960, Riguet doit s'occuper de la partie « organisation logique des machines » d'un séminaire sur la cybernétique en Sorbonne; en 1973, il prépare l'organisation d'un séminaire « Théorie des automates et systèmes biologiques et chimiques » à l'hôpital Necker :

« Parmi les rêveries interdisciplinaires, il n'y en a sans doute pas de plus séduisantes que celles d'un rapprochement de la biologie, de l'informatique et de la théorie des systèmes.

« Les développements récents de ces dernières années débordent en effet largement le domaine cybernétique dont on sait l'échec du mariage avec le domaine biologique classique après l'engouement des années 1950.

« Il semble donc qu'il soit temps de se mettre au travail et d'essayer de réaliser en Europe ce qui l'est déjà aux U.S.A. [...]»⁷¹.

Il y a toujours une optique algébriste généralisante, dans la lignée des travaux américains de la fin des années 1960 (qui donneront lieu à des échanges)⁷², et dans lesquels la notion de machine demeure un objet d'étude central.

Couffignal, quant à lui, ne prononce aucune conférence dans le cadre du CECyB, mais il va publier assez régulièrement dans les colonnes de la revue *S.E.T.* de Ducassé. Revenons sur l'article qu'il confie au n° 7 de *Thalès*, « La Mécanique comparée ».

69. RIGUET, 1954: « Récemment notre collaboration récente avec le Docteur W. R. Ashby nous a permis d'algébriser certains problèmes de cybernétique [...] »

70. Il présente deux communications au premier congrès de 1956, dont il ne reste que de brefs résumés: « Causalité et théorie des machines », qui aborde le thème de la « Définition algébrique précise de la notion de machine. Emploi de ce modèle algébrique en cybernétique »; l'autre communication a pour titre « Syntaxe, programmation et synthèse des machines ».

71. RIGUET, 1973.

72. Par exemple, son séminaire pour l'année 1976 consacre une séance à des « Recherches récentes du point de vue catégorique sur la théorie du contrôle ». Voir par ailleurs: ARBIB, 1962; ARBIB et MANES, 1974.

Il se présente comme une synthèse critique du Congrès international de 1951. Couffignal mentionne son échange avec Lichnerowicz. Il s'agit donc de relancer une théorie des machines dans un nouveau contexte. Mais la mécanique comparée n'est pas un nouveau nom donné à l'ancien projet de 1938, il s'agit d'une généralisation qui contient l'analyse mécanique en lui adjoignant une réflexion méthodologique critique pour l'application de la notion de machine à la biologie. En 1938, Couffignal avait maintenu la biologie à l'écart de son projet ; mais en 1942, il travaille avec le physiologiste Louis Lapicque sur des analogies entre cerveau et machine à calculer. La mécanique comparée est donc la réplique de Couffignal à la cybernétique américaine, qui, dit-il, pose les bons problèmes mais les aborde avec de mauvaises méthodes. Et cette refonte généralisante de l'analyse mécanique lui ajoute un projet de bonne méthode, en problématisant explicitement une question qui restait indécise en 1938 – celle des « rapprochements » entre classes de fonctions – qui s'identifie au débat relatif au statut épistémologique du raisonnement analogique. La bonne méthode, c'est une méthode d'analogies entre fonctions, non entre structures, et non mathématiques⁷³. Par la suite, Couffignal va adopter le label « cybernétique », mais en conservant les caractéristiques générales de son projet de 1951. La notion de machine demeure intacte. Dans la revue *S.E.T.*, il publie en 1957 une conférence « La cybernétique des machines », dans laquelle il analyse deux grandes familles de machines-outils (tours et perceuses) ; il n'y a plus de formules fonctionnelles, mais un certain nombre de propositions apparentées aux « lois » que l'analyse mécanique abstraite de 1938 voulait dégager : logiques, axes et normes d'évolution⁷⁴. La cybernétique de Couffignal, entendue comme « art de rendre efficace l'action », est alors en parfaite continuité avec l'analyse mécanique de 1938, sauf du point de vue méthodologique. Il y a un déplacement de la pondération des trois composantes : atrophie de la partie descriptive, et développement de la partie abstraite, avec des « lois » rebaptisées en « principes ».

En juin 1953, une séance du CECyb intitulée « Définitions et terminologie en cybernétique » est organisée ; puis en novembre, la dernière réunion a pour objet la « délimitation du domaine propre à la cybernétique ». Si de telles initiatives constituent un réquisit fondamental de toute recherche, leur position terminale, sans suite, dans la série de conférences du Cercle, peut aussi être interprétée comme un symptôme de la difficulté, sinon de l'impossibilité d'intégrer différentes approches ou attentes. De la convergence des acteurs vers la rue du Four – adresse de l'Institut d'histoire des sciences et des techniques – n'a pas résulté une convergence de leurs projets.

73. Cette fois, la critique de la mathématisation excessive ne vise pas l'algèbre, mais Wiener et les cybernéticiens américains qui appliquent le calcul des probabilités à la transmission nerveuse avec la « théorie de l'information ». Le critère de valorisation des analogies entre fonctions au détriment des analogies entre structures provient de l'échec des recherches de Couffignal avec Lapicque, reconnu progressivement, et dont il tente de tirer une leçon méthodologique.

74. Notamment : « Le progrès de l'automatisme s'identifie au progrès de la mécanisation de l'esprit » ; « Il est techniquement possible de faire exécuter par une machine toute suite d'opérations qui peut être décrite dans la langue appropriée » ; « La complication, la fragilité ou l'encombrement d'une machine augmente très vite avec le degré d'automatisme et la finesse de l'opération à exécuter » ; ou encore « Une machine efficace est une machine spécialisée ». Voir COUFFIGNAL, 1957, p. 5-10 (I^{re} part.) et p. 11 (II^e part.).

IMPOSSIBLE INTÉGRATION

L'absence de traces relatives aux discussions du Cercle d'études cybernétiques rend *a priori* malaisée la délimitation entre les facteurs épistémologiques et les facteurs psycho-sociologiques empêchant la constitution d'une théorie générale à partir de recherches hétérogènes. En effet, on sait d'une part que les controverses scientifiques révèlent souvent les conceptions philosophiques des protagonistes, et d'autre part que les échanges interdisciplinaires, comme le dit Pierre Bourdieu, sont l'occasion à laquelle les *habitus* propres à chaque discipline deviennent explicites. L'incompatibilité des projets tient-elle à l'incompatibilité des méthodes ou cadres théoriques, ou à l'incompatibilité de choix ou de postulats orientant ces théories, toujours marqués par une philosophie et des jugements de valeur implicites ? L'absence de discussions archivées n'empêche pas de fournir quelques éléments de réponse par comparaison des doctrines.

La généralité de la notion de machine commune aux différents projets n'est pas une pure illusion verbale. En particulier, on peut constater une certaine continuité sur le plan de la classification des machines : l'équivalence entre machines réflexes et servomécanismes était déjà connue à l'époque (à commencer par Lafitte lui-même) ; la proximité entre les autres catégories de Lafitte et celles de Wiener *et alii* a aussi été relevée par ailleurs⁷⁵, mais elle soulève du coup le problème de considérer ces autres catégories comme des transducteurs : y a-t-il un sens à définir une machine passive (par exemple une maison) par une fonction de transfert, une relation entrée-sortie ? Plus la machine est passive, en effet, plus ses caractères structuraux importent ; or, ce sont ceux-là même que l'analyse comportementale (« approche boîte noire ») laisse délibérément de côté. Le recouvrement des classes de machines n'est donc pas garanti. Il est à noter que Couffignal reprend lui aussi les « machines réflexes » dans son opuscule *Les Notions de base*, bien qu'il n'ait jamais cité Lafitte dans ses travaux (ce qui peut paraître plus surprenant en 1958 qu'en 1938).

Mais il existe une divergence entre les conceptions de Lafitte et celles de Wiener en ce qui concerne l'évolution des machines : pour le premier (comme implicitement, d'ailleurs, pour Couffignal), celle-ci suit une loi d'accroissement de la complexité ; pour le second, au contraire, la sélection naturelle éliminera infailliblement les organismes trop complexes. En outre, Lafitte s'intéresse à ce qu'il y a de spécifique aux machines-objets techniques, par rapport aux organismes vivants et aux organisations sociales, alors que Wiener s'intéresse à ce qu'ils ont en commun. Le premier cherche une discipline à côté des autres, le second un schématisme transversal.

Un autre obstacle essentiel à la constitution d'une théorie générale réside dans l'absence de formalisme unificateur. Dans le cas de la cybernétique, le sujet est complexe et dépend en particulier de la façon dont on définit ses rapports avec la théorie du contrôle (*feedback*, régulation) et la théorie des automates : est-ce qu'elle se confond avec l'une ou l'autre, est-ce qu'elle « contient » l'une ou l'autre, ou les

75. Voir SEGAL, 2003, p. 265. La comparaison est faite avec l'article « Behaviour, Purpose and Teleology » (ROSENBLUETH, WIENER et BIGELOW, 1943). Dans celui-ci, toutefois, les qualificatifs de *active*, *passive* et *purposeful* se rapportent à des classes de comportements, et non d'individus.

deux? Cette question est difficile, relativement arbitraire, et en général éludée par les commentateurs. Selon la réponse qu'on lui donne, on n'écrit pas la même histoire... Faute de pouvoir la discuter en détail, on se contentera d'affirmer que le schématisme cybernétique n'est pas solidaire d'un formalisme particulier. Qu'on les considère comme internes ou externes, plusieurs lignes de fracture fragilisent de toute façon la cybernétique : modélisation continue pour Wiener, discrète pour von Neumann, Riguet, et par extension Ashby. L'opposition entre une conception « physicaliste » du premier et une conception « logiciste » des autres, avancée par d'autres commentateurs, nous semble moins pertinente que l'opposition entre holisme et réductionnisme, le premier reconnaissant une importance aux comportements finalisés à l'échelle macro, que l'autre tente de liquider par réduction à une combinatoire d'éléments fondamentaux à une échelle inférieure. Au sujet des machines auto-répliquatives, Wiener explicite sa distinction avec von Neumann, ce qui est assez rare pour être relevé :

« Il y existe deux points de vue sur ces machines, bien qu'il y ait bien plus de deux personnes à travailler dessus. Le premier, dû à von Neumann, est essentiellement combinatoire. Il cherche principalement à montrer qu'il n'y a pas d'impossibilité combinatoire à ce qu'une machine en fabrique une autre à son image. Ici, l'image est conçue comme une structure quasi statique qui représente la machine et peut produire d'autres structures identiques. Dans cette approche, le fait que la structure soit opérative, accomplisse certaines fonctions, n'entre pas en ligne de compte.

« Ce n'est pas le point de vue que j'adopte ici. On considérera la machine comme une structure opérative fabriquant d'autres structures opératives à son image par la combinaison appropriée⁷⁶. »

À côté (et indépendamment) du profil algébrique de Riguet, le choix de Bourbaki par Ashby semble moins naturel et appelle quelques commentaires. Tout d'abord, on peut se demander ce qu'il signifie au regard des relations qu'entretient Ashby, dans le cadre des échanges autour de la cybernétique (par exemple les conférences Macy), avec les mathématiciens exceptionnels que sont Wiener et von Neumann. Ces derniers ont chacun leur style, mais Ashby ne paraît pas manger à leur râtelier. Peut-être y a-t-il à cela une raison stratégique, de la part de ce chercheur qui n'est pas mathématicien de formation, et qui trouverait ainsi un vecteur original d'affirmation, une alliance alternative qui ne le rende pas dépendant des deux « superpuissants » américains. L'hypothèse d'un facteur national, d'une défiance à l'égard d'une « marshallisation » des sciences européennes, n'est pas à négliger, mais sa portée exacte et ses conditions de manifestation restent à définir. Ensuite, ce choix pose le problème de la capacité de cette configuration mathématique à remplir le contrat de la très grande généralité qu'ambitionne Ashby. Il y a là bien sûr un pari, lui-même directement tributaire du pari bourbachique de reconstruction intégrale de l'architecture des mathématiques. On peut voir que la confiance d'Ashby est fondée sur une vision un peu simpliste de Bourbaki⁷⁷, sans doute

76. WIENER, 1962, p. 1.

77. Voir l'introduction d'ASHBY, 1962.

courante à l'époque (surtout de l'extérieur du champ mathématique). Or, il apparaît que ce choix impliquait potentiellement une incompatibilité sérieuse entre une théorie bourbakhique des machines et la méthode d'analyse des transducteurs de Wiener, laquelle repose sur l'usage d'un modèle de processus aléatoire (dit de Wiener-Lévy) exclu du plan Bourbaki. L'article de Norbert Meusnier, sur lequel nous nous fondons, ne permet pas cependant de déterminer précisément si les causes de cette exclusion sont d'ordre épistémologique ou axiologique⁷⁸. Dans tous les cas, l'absence de cadre formel unifié n'est pas qu'une question de diversité des styles.

On peut constater aussi que l'unité formelle d'une théorie des machines ne peut provenir des diagrammes. La période est prolixe en usage de schémas fonctionnels, diagrammes-blocs et autres organigrammes, et la question de savoir si ces objets sont intégralement mathématisables ne trouve pas de réponse évidente. Chez Couffignal, la méthode de représentation par « formules fonctionnelles » n'est apparemment plus utilisée après sa thèse de 1938, pour des raisons qu'il n'a pas mentionnées. Peut-être la concurrence de la théorie des automates représente-t-elle un désaveu pour la distance qu'il essaye de préserver avec les mathématiques ? Les choses ne sont sans doute pas si simples, car l'usage de plus en plus codifié de la théorie des graphes pour représenter les automates ne devient pas la norme avant les années 1960. Au regard du reste de son œuvre écrite, on peut s'étonner de l'absence d'allusion au statut des diagrammes. Ce qui, chez lui, constituait l'analyse descriptive, avec les formules fonctionnelles, semble devenu dans sa « cybernétique » purement discursif et réduit à la portion congrue ; effet, peut-être, d'une meilleure implantation de méthodologies concurrentes, puisque se sont développés en parallèle d'autres symbolismes⁷⁹ toujours bien établis.

Un problème subsistait dans la thèse de 1938 : les entités étaient réduites par la subsomption des organes aux fonctions ; mais l'étude de cas était faite uniquement sur les machines à calculer, si bien que les relations entre fonctions (représentées par des flèches dans les formules fonctionnelles) étaient toutes homogènes, se réduisant au transport d'un nombre. En extrapolant la théorie à toutes les machines, comment garantir qu'on ne va pas avoir affaire à une prolifération de relations *ad hoc* de toutes natures, et se retrouver dans une situation comparable à celle de Reuleaux avec ses poulies ? Couffignal a peut-être abandonné les formules fonctionnelles pour cette raison, conscient, au vu des progrès de la théorie des automates, des avantages de l'algèbre, qu'il n'envisageait pas à l'époque du fait de la conception qu'il s'en faisait, et à la reconnaissance desquels son hostilité à Bourbaki constitue ensuite certainement un frein.

Mais il y a, chez Couffignal, des antagonismes avec les autres projets qui tiennent de plus près à la conceptualisation des machines. On a déjà dit que sa critique de la mathématisation du concept de machine visait expressément Wiener ; mais c'est aussi le cas des machines virtuelles : machines de Turing et automates. Selon lui, la théorie

78. MEUSNIER, 2004, p. 262-265. En bref : est-ce que les options prises par Bourbaki résultaient mécaniquement d'autres choix fondamentaux, ou bien est-ce que ces autres choix étaient faits *en vue* d'exclure des objets considérés comme tétatologiques ?

79. On trouve quelques éléments de cette histoire dans AÏT-EL-HADI, 2002 ; MINDELL, 2002 ; REMAUD, 2004. Remarquons que l'analyse mécanique n'est pas un ancêtre pur et simple de l'actuelle méthode d'analyse fonctionnelle SADT (*Structured Analysis and Design Technique*), car il s'agit bien d'un projet de discipline, avec des exigences théoriques et épistémologiques.

doit prendre pour objet « les machines construites jusqu'à présent », et non des « êtres de fiction »⁸⁰. Dans sa définition de la machine, qui restera constante, la machine est « un être physique », « construit par l'homme »⁸¹. Cette définition critique d'une part le virtualisme mathématique au nom d'un critère de réalisabilité physique, et à ce titre amène Riguet dans son collimateur :

« Il faut considérer comme expérience imaginée un modèle que l'on n'a pas construit effectivement. En particulier, les êtres conceptuels appelés machines par Turing et M. Riguet et sur lesquels sont établis des raisonnements mathématiques dont on laisse entendre qu'ils sont valables pour les notions que l'on attache de coutume aux machines matériellement réalisées et dont on peut observer (au sens des physiciens et des naturalistes) le fonctionnement, risquent, quand on tente de les construire, de causer des déceptions du genre de celles qu'a produites, après soixante-dix ans d'exercice, le démon de Maxwell⁸². »

D'autre part, le critère de construction par l'homme dans la définition de Couffignal exclut les « *self-reproducing automata & machines* » de von Neumann et Wiener; Lafitte envisage ce cas, qui sort du cadre de la mécanologie, puisque ces machines se rangeraient alors parmi les êtres vivants et « cesseront d'être des machines véritables ». Le facteur humain est plus présent en principe qu'en pratique dans la démarche de Couffignal⁸³; si c'est Lafitte qui y insiste le plus, il jouit de la situation confortable de n'avoir pas été jusqu'à détailler une méthodologie dans laquelle il aurait dû l'inclure effectivement; le « darwinisme » de Wiener est plus subtil qu'il n'y paraît, mais on ne prendra pas la peine de le démontrer ici. Son articulation avec des considérations sur les conditions sociales de l'invention peut se faire dans un cadre – conceptuel, et non formel – que l'on peut qualifier de cybernétique; Riguet et Ashby, enfin, ne semblent pas *a priori* en avoir tenu compte, mais était-ce dans leur intention? La généralité de leur théorie s'arrête-t-elle là où commence l'historicité de son objet?

Ce qui vient au premier plan à travers le débat sur la simulation, c'est la question de la portée historique des formalismes. La critique de Couffignal aux algébristes est tardive, elle peut faire oublier que lui-même partageait en 1938 avec la tradition cinématique la conception d'un répertoire fondamental de composants universels des machines; peu importe qu'il s'agisse d'organes ou de fonctions, le même problème se serait présenté.

80. Voir COUFFIGNAL, 1938a, p. 41; COUFFIGNAL, 1963, p. 79. Dans ses travaux de jeunesse, l'absence de référence de Couffignal à Turing et Gödel joue certainement un rôle dans sa conception du calcul mécanique. Il est contre l'idée de « machine universelle », comme le dit explicitement son principe qu'« une machine efficace est une machine spécialisée ». On remarque aussi que dans l'analyse mécanique de 1938, il n'y a pas de distinction entre le *software* et le *hardware* (l'impression et l'effaçage sont mis sur le même plan que le calcul).

81. Voir par exemple COUFFIGNAL, 1957, p. 2 et 1963, p. 80.

82. COUFFIGNAL, 1956, p. 337. La critique des expériences de pensée repose sur l'idée que l'on ne calcule que sur des modèles génériques, et que l'on risque de ne pas prévoir des problèmes singuliers posés par les situations réelles: « L'accident est fréquent, si l'on part des mathématiques » (COUFFIGNAL, 1951, p. 9). Ce que Couffignal rejette par principe, c'est la valeur épistémologique des simulations virtuelles non implémentées physiquement.

83. COUFFIGNAL, 1938a, p. 34.

Les formules fonctionnelles permettaient de comparer directement toute la lignée des machines à calculer depuis Pascal. En plus du problème de l'extrapolation à d'autres lignées s'ajoute donc le problème de l'extrapolation temporelle sur des échelles de temps plus importantes. La remarque est tout aussi valable pour le modèle de métier Jacquard de Riguet. Quant à Ashby, sa référence déjà mentionnée au biologiste qui étudie des espèces disparues suppose également une commensurabilité d'éléments fondamentaux. Ce postulat de légitimité transhistorique d'une formalisation éveille l'attention de l'historien à plusieurs égards. Quelle est la valeur de la modélisation et de la simulation pour l'historien⁸⁴? Une théorie axiomatisée implique-t-elle que les différentes formes machiniques apparaissant au cours du temps ne soient que les manifestations d'une combinatoire intemporelle? S'il y a peu de chances qu'une telle théorie résiste à l'épreuve du temps – tant sont nombreux les axes et rapide le rythme de l'innovation, pour ne rien dire de leur imprévisibilité – il est tout à fait remarquable, d'une part, que la prolifération des formes techniques et l'accélération de leur évolution n'aient en rien ralenti la fréquence d'apparition de projets de théories générales formalisées, et d'autre part que chacune d'elles s'essaye à réinterpréter rétrospectivement des lignées antérieures de machines. Smaïl Aït-el-Hadj observe, au sujet de la cybernétique, qu'elle « produit, par l'universalisation de [la] modélisation des machines à information, un retour sur la modélisation de toutes les machines [...] »⁸⁵ ; il subsiste cependant un écart entre la réinterprétation et la formalisation effective, qui n'a pas lieu dans le cadre d'une théorie unifiée : ce n'est pas la modélisation qui est universalisée. La cybernétique, au sens initial que lui donne Wiener, n'est pas réellement une théorie ; mais en constituant, à un moment donné, un point de convergence entre les axes naturaliste et formaliste, elle tient lieu d'attracteur pour les différents projets théoriques. Son mérite minimal nous paraît être qu'aucun projet ultérieur de théorie des machines ne puisse ignorer le problème de la conjonction de ces deux axes ; en droit, tout du moins, car l'histoire de ces projets montre de sérieuses difficultés de mise en œuvre et d'institutionnalisation, pour l'intelligence desquelles les lunettes du sociologue deviennent aussi indispensables que celles de l'épistémologue⁸⁶.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- AÏT-EL-HADJ (Smaïl), 2002, *Systèmes technologiques et innovation, itinéraire théorique*, Paris, L'Harmattan.
- ARBIB (Michael A.), 1962, « A Common Framework for Automata Theory and Control Theory », *SIAM Journal on Control and Optimization*, vol. 3, n° 7, p. 206-222.
- ARBIB (M. A.) et MANES (E. G.), 1974, « Machines in a Category. An Expository Introduction », *SIAM Review*, vol. 16, n° 2, p. 163-192.

84. Remarquons que c'est une question posée effectivement par le développement de méthodes de simulation. Voir par exemple LAROCHE, BERNARD et COTTE, 2006.

85. AÏT-EL-HADJ, 2002, p. 88 (c'est l'auteur qui souligne).

86. Nous souhaitons remercier Paul BRAFFORT, Paul-Henri COUFFIGNAL, Marie-Josée DURAND-RICHARD, Owen HOLLAND, Philip HUSBANDS, David POUVREAU, Jacques RIGUET, Sophie ROUX, Robert VALLÉE.

- ASHBY (William Ross), 1951, « Statistical Machinery », *Thalès. Recueil annuel des travaux de l'Institut d'histoire des sciences et des techniques de l'université de Paris*, n° 7, p.1-7.
- ASHBY (W. R.), 1956, *An Introduction to Cybernetics*, Londres, Chapman & Hall.
- ASHBY (W. R.), 1962, « The Set Theory of Mechanism and Homeostasis », dans *Technical Report*, Urbana, University of Illinois (Electrical Engineering Research Laboratory, n° 7), rééd. dans *General Systems Yearbook*, Wash. DC, Society for General Systems Research, vol. IX, p. 83-98, 1964.
- ASHBY (W. R.) et RIGUET (J.), 1960, « The Avoidance of Over-writing in Self-Organizing Systems » (Technical Report, n° 1, National Bureau of Standards, NBS00654), *Journal of Theoretical Biology*, vol. I, n° 4, p. 431-439.
- COUFFIGNAL (Louis), 1938a, *Sur l'analyse mécanique. Application aux machines à calculer et aux calculs de la mécanique céleste*, thèse de la faculté des sciences de Paris.
- COUFFIGNAL (L.), 1938b, « Un point de vue nouveau dans l'étude de la machine : l'analyse mécanique », *Europe*, n° 188, p. 438-450.
- COUFFIGNAL (L.), 1951, « La mécanique comparée », *Thalès. Recueil annuel des travaux de l'Institut d'histoire des sciences et des techniques de l'université de Paris*, n° 7, p. 9-36.
- COUFFIGNAL (L.), 1956, « Quelques réflexions et suggestions », *Dialectica*, vol. X, n° 4, p. 336-339.
- COUFFIGNAL (L.), 1957, « La cybernétique des machines », *Structure et évolution des techniques*, n° 55-56, p. 1-10 (I^e part.), n° 57-58, p. 1-11 (II^e part.).
- COUFFIGNAL (L.), 1963, *La Cybernétique*, Paris, Presses universitaires de France (Que sais-je?, n° 638).
- GIANNAKIS (Georgios B.) et SERPEDIN (Erchin), 2001, « A Bibliography on Nonlinear System Identification », *Signal Processing*, vol. 81, n° 3, p. 533-580.
- GUILBAUD (Georges Théodule), 1950, « Divagations cybernétiques », *Esprit*, n° 9, p. 281-295.
- GUILBAUD (G. T.), 1954, *La Cybernétique*, Paris, Presses universitaires de France (Que sais-je?, n° 638).
- HUSBANDS (Philip) et HOLLAND (Owen), 2008, « The Ratio Club. A Hub of British Cybernetics », dans HUSBANDS (Philip), HOLLAND (Owen) et WHEELER (Michael), *The Mechanical Mind in History*, Cambridge, MIT Press, p. 91-148.
- LAFITTE (Jacques), 1932, *Réflexions sur la science des machines*, Paris, Bloud & Gay.
- LAFITTE (J.), 1933, « Sur la science des machines », *Revue de synthèse*, t. VI, n° 2, p. 143-158.
- LAROCHE (Florent), BERNARD (Alain) et COTTE (Michel), 2006, « Methodology for Simulating Ancient Technical Systems », *Revue internationale d'ingénierie numérique*, vol. II, n° 1-2, p. 9-27.
- Les Machines à calculer et la pensée humaine*, 1953, Actes du 37^e congrès international du CNRS, Paris, 8-13 janvier, Paris, Éditions du CNRS.
- MEUSNIER (Norbert), 2004, « Sur l'histoire de l'enseignement des probabilités et des statistiques », dans BARBIN (Évelyne) et LAMARCHE (Jean-Pierre), *Histoires de probabilités et de statistiques*, Paris, Ellipses, p. 237-273.
- MINDELL (David A.), 2002, *Between Human and Machine. Feedback, Control and Computing before Cybernetics*, Baltimore, John Hopkins University Press.
- MOSCONI (Jean), 1989, *La Constitution de la théorie des automates*, thèse de l'université de Paris I.
- PERRIN (Dominique), 1995, « Les débuts de la théorie des automates », *Technique et science informatiques*, vol. XIV, n° 4, p. 409-433.

- REMAUD (Patrice), 2004, *Une histoire de la genèse de l'automatique en France 1850-1950. De l'école de la régulation française au début du XX^e siècle à l'émergence de l'automatique en France après la Seconde Guerre mondiale*, thèse du Conservatoire national des arts et métiers (CNAM), Paris.
- RIGUET (Jacques), 1953, « Sur les rapports entre les concepts de machine, de multipôle et de structure algébrique », *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t. 237, p. 425-427.
- RIGUET (J.), 1954, « Applications de la théorie des relations binaires à l'algèbre et à la théorie des machines », *Abstract from the Proceedings of the International Mathematical Congress*, Amsterdam, [1p.].
- RIGUET (J.), 1957, « Le calcul des relations en tant qu'outil méthodologique », dans LE LIONNAIS (François), *La Méthode dans les sciences modernes*, Paris, Éditions Science et Industrie, p. 69-82.
- RIGUET (J.), 1959, « Décomposition du groupe symétrique suivant un double module cyclique et théorie du tissage », *Séminaire Dubreil. Algèbre et théorie des nombres*, t. 12, n° 1, exposé n° 11, p.1-10.
- RIGUET (J.), 1961, « Les mathématiques pures », dans BERGIER (Jacques), dir., *Encyclopédie des sciences et des techniques*, Paris, Rombaldi, t. II, p. 21-63.
- RIGUET (J.), 1973, « Information préliminaire : un séminaire sur la théorie des automates et des systèmes chimiques et biologiques ; un symposium sur le même sujet », feuillet tapuscrit, Université Paris V-René Descartes, 29 octobre.
- ROSENBLUETH (Arturo), WIENER (Norbert) et BIGELOW (Julian), 1943, « Behaviour, Purpose and Teleology », *Philosophy of Science*, vol. 10, p. 18-24.
- RUSSO (François), 1951, « La cybernétique située dans une phénoménologie générale des machines », *Thalès. Recueil annuel des travaux de l'Institut d'histoire des sciences et des techniques de l'université de Paris*, n° 7, p. 69-75.
- RUSSO (F.), 1955, « Fondements de la théorie des machines », *Revue des questions scientifiques*, 20 janvier, p. 43-74.
- SEGAL (Jérôme), 2003, *Le Zéro et le Un. Histoire de la notion scientifique d'information au XX^e siècle*, Paris, Syllepse.
- VALLÉE (Robert), 1990, « The "Cercle d'études cybernétiques" », *Systems Research*, vol. 7, n° 3, p. 205.
- VARENNE (Franck), 2004, *Le Destin des formalismes. À propos de la forme des plantes : pratiques et épistémologies des modèles face à l'ordinateur*, Lyon, thèse de l'Université Lumière (http://theses.univ-lyon2.fr/sdx/theses/lyon2/2004/varenne_f).
- WIENER (Norbert), 1948, *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Paris/New York/Cambridge, Hermann/Wiley & Sons/Technology Press, 2^e éd. Cambridge, MIT Press, 1961.
- WIENER (N.), 1952, « A Treatise on Cybernetics », tapuscrit inédit, Archives de Norbert Wiener au MIT (29C-685).
- WIENER (N.), 1958, *Nonlinear Problems in Random Theory*, Cambridge, MIT Press.
- WIENER (N.), 1962, « The Mathematics of Self-Organizing Systems », dans MACHOL (Robert E.) et GRAY (Paul E.), dir., *Recent Developments in Information and Decision Processes*, New York, Macmillan, p. 1-21.
- WIENER (N.), 1964, *God & Golem, Inc.*, Cambridge, MIT Press.